



TITLE:

リモートセンシングによる植生の
渇水ストレス状態の計測(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

今西, 純一

CITATION:

今西, 純一. リモートセンシングによる植生の渇水ストレス状態の計測.
京都大学, 2004, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2004-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k10897>

RIGHT:

新制

農

890

リモートセンシングによる植生の渇水ストレス状態の計測

2004 年

今 西 純 一

リモートセンシングによる植生の渇水ストレス状態の計測

2004 年

今 西 純 一

目 次

第 1 章	序論.....	5
1.1	研究の背景と目的.....	5
1.2	既存の植生指数のレビュー.....	7
1.2.1	反射スペクトルの赤および近赤外バンドを利用する植生指数.....	7
1.2.2	反射スペクトルを利用するその他の植生指数.....	11
1.2.3	1階微分スペクトルを利用する植生指数.....	12
1.2.4	2階微分スペクトルを利用する植生指数.....	13
1.2.5	まとめ.....	14
第 2 章	熱慣性特性値 (TRN) および代替熱慣性特性値 (ATRN) による植生渇水 ストレスの計測.....	16
2.1	背景と目的.....	16
2.2	方法.....	17
2.3	結果.....	20
2.3.1	2002 年 8 月 11 日の結果.....	20
2.3.2	2002 年 8 月 23 日の結果.....	20
2.3.2.1	天候.....	20
2.3.2.2	渇水ストレス状態.....	21
2.3.2.3	個葉レベルの TRN、ATRN.....	22
2.3.2.4	群落レベルの TRN、ATRN.....	23
2.3.3	衛星・航空機センサーの精度の考慮.....	25
2.4	考察.....	25
2.4.1	日射量の短時間の変化にたいする TRN、ATRN の応答.....	25
2.4.2	日射量の大きさと TRN、ATRN の安定性.....	25
2.4.3	TRN(dawn)、ATRN の応用可能性.....	26
2.4.4	TRN(dawn)、ATRN の観測時刻.....	27
2.5	まとめ.....	27

第3章	ハイパースペクトルによる植生渇水ストレスの計測.....	29
3.1	渇水ストレスにともなう微分スペクトルの変化とその特徴.....	29
3.1.1	背景と目的.....	29
3.1.2	方法.....	31
3.1.3	結果.....	34
3.1.3.1	渇水ストレス状態および LAI.....	34
3.1.3.2	スペクトル上の変化.....	35
3.1.3.3	土壌の微分スペクトル.....	38
3.1.3.4	レッドエッジポジション.....	38
3.1.3.5	相関および偏相関係数スペクトル.....	39
3.1.4	考察.....	39
3.1.4.1	実験条件について.....	39
3.1.4.2	樹冠スペクトルの変化.....	43
3.1.4.3	微分スペクトルの有効性.....	45
3.1.4.4	レッドエッジポジションの有効性.....	46
3.1.4.5	最適な単変量指数.....	46
3.1.5	まとめ.....	46
3.2	ハイパースペクトルによる最適な植生指数の探索.....	47
3.2.1	背景と目的.....	47
3.2.2	方法.....	47
3.2.3	結果.....	51
3.2.3.1	渇水ストレス状態.....	51
3.2.3.2	渇水ストレスにともなう各種パラメーターの変化.....	51
3.2.3.3	スペクトル上の変化.....	54
3.2.3.4	相関および偏相関スペクトル.....	54
3.2.3.5	最適なハイパースペクトル植生指数.....	60
3.2.3.6	既存の植生指数の相関および偏相関係数.....	60
3.2.3.7	波長分解能を低下させた場合のシミュレーション結果.....	66
3.2.3.8	渇水ストレスにともなうスペクトル変化のモデルによるシミュレーション.....	66
3.2.4	考察.....	68

3.2.4.1 渇水ストレスにともなうスペクトル変化のしくみ	68
3.2.4.2 渇水ストレス計測のための単バンドの利用	70
3.2.4.3 渇水ストレスおよび LAI の独立した計測のための植生指数	71
3.2.4.4 選択された植生指数の反応機構	72
3.2.4.5 波長分解能や土壌バックグラウンド効果の影響	77
3.2.5 まとめ	78
 第 4 章 結論：緑地診断・管理における利用に向けて	80
 謝辞	84
 参考文献	85

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

植生の渇水ストレス状態の計測は、緑地の診断や管理に欠かせない。なぜなら、渇水ストレスは緑化植物の活着および成長にもっとも影響を及ぼす要因のひとつであるからである。植物の渇水ストレスは、光合成速度や蒸散速度、木部圧ポテンシャル、樹液流動など比較的短期間に反応を示す指標のほか、短枝と長枝の比率、葉や樹の形状、年輪幅など比較的長期間の影響を表す指標によって評価することが可能である。しかし、これらの指標は単木から個葉のスケールの計測においては効果的であるが、緑地の診断や管理に必要とされる群落あるいは景観スケールの計測には、計測効率やコストの観点からは不向きな面も多い。この課題に有効な解決策を提示することができる技術として、衛星や航空機により地球表面を観測するリモートセンシングがあげられている。リモートセンシングは、広域性、同時性、反復性にすぐれており、緑地の診断や管理に必要とされる面的、量的な植生の評価に適している。

これまで、リモートセンシングによる植生の渇水ストレスを含む植生の活力度（活性度）の評価には、正規化差分植生指数（NDVI）が広く用いられてきた。例えば、森本（1991）は街路樹の活力度指標のひとつとして、Fitz-Rodriguez and Choi（2002）は芝生のストレス状態を評価するために NDVI を用いている。また、とくに乾燥地あるいは半乾燥地では植生の活力度と土壌水分量の間に密接な関係があることから、NDVI は渇水ストレス状態を評価するための指標として広く用いられている（國友ら, 1998; Ji and Peters, 2003）。

NDVI は次式により表される植生指数である。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

R_{RED} ：赤域（波長約 670 nm 付近）の反射率

R_{NIR} ：近赤外域（波長約 800 nm 付近）の反射率

健全な植生とストレスを受けて弱った植生の樹冠反射スペクトルは、一般に図 1.1 のような変化を示す。健全な植生における赤域の反射率は、ほとんどが葉のクロロフィルの吸収によるものである。そして、健全な樹冠の反射スペクトルを、ストレスを受けた樹冠の反射スペクトルと比較すると、赤域で反射率が低く、近赤外域で反射率が高いことがわかる。NDVI はこの現象を利用しており、健全な植生では高く、ストレスを受けた

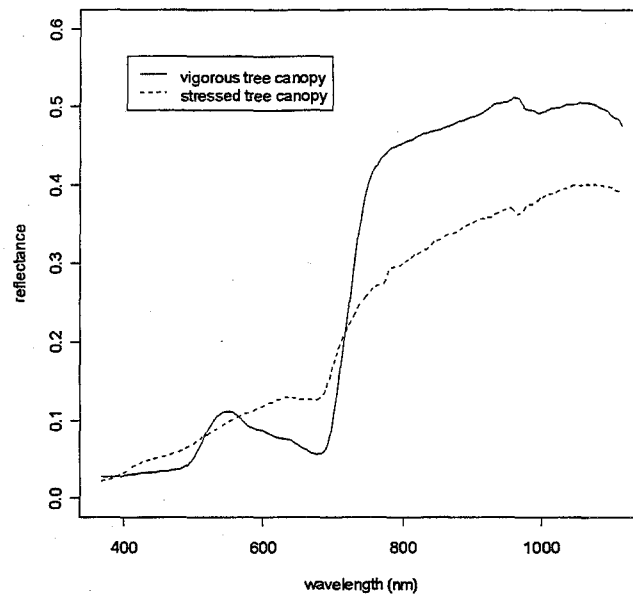


図 1.1 ストレスにともなう樹冠反射スペクトルの典型的な変化の例.

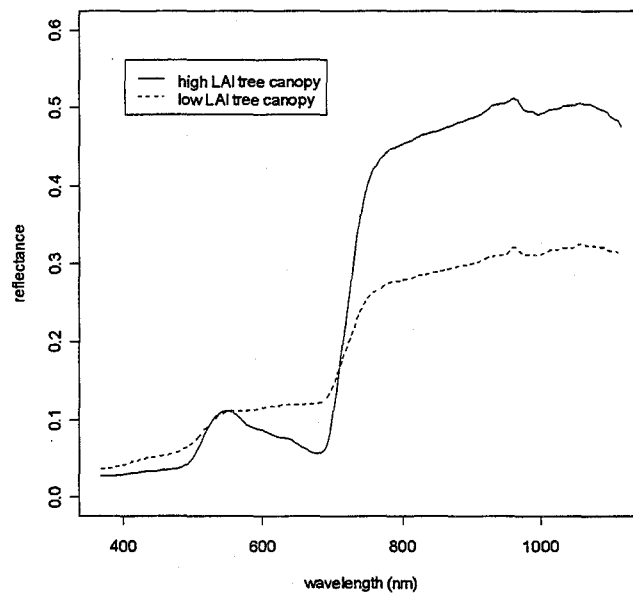


図 1.2 LAI の違いによる樹冠反射スペクトルの典型的な変化の例.

植生では低い指数値を示す。

一方、樹冠の葉面積指数 (LAI) が高いと、クロロフィルの吸収により赤域の反射率は低くなり、葉の近赤外域における高反射特性により近赤外域の反射率は高くなることが知られている (図 1.2)。LAI の増加にともなう反射率のこの増減の方向は、植物が

ストレスを受ける場合と同じであり、NDVI やそれを改良した植生指数も基本的にこの原理を利用している。したがって、現在、緑化状況のモニタリングにもっとも広く使われている NDVI やその改良型植生指数は、渇水ストレス状態と樹冠の葉の粗密度の影響を同時に受けるため、必ずしも渇水ストレス状態をよく反映した指数であるとは言えない。

そこで、本研究は、蒸散を介して渇水ストレスと直接的な関係をもつ熱慣性特性値 (TRN) や、樹冠の詳細な反射特性のわかるハイパースペクトルデータを利用した、植生渇水ストレス指数の開発を目的とする研究を行った。

1.2 既存の植生指数のレビュー

表 1.1 に、本研究で検討した既存の主要な植生指数を示した。以下、植生指数は略称を用い、表 1.1 に参考文献が載っている場合は本文中にとくにこれを示さない。なお、式に共通して現れる記号とその意味をここに記しておく。

R_{BLUE} : 青域 (約 470 nm 付近) の反射率

R_{RED} : 赤域 (約 670 nm 付近) の反射率

R_{NIR} : 近赤外域 (約 800 nm 付近) の反射率

R_λ : 波長 λ (nm) における反射率

F_λ : 波長 λ (nm) における反射スペクトルの 1 階微分値

S_λ : 波長 λ (nm) における反射スペクトルの 2 階微分値

a : ソイルラインの傾き

b : ソイルラインの切片

ソイルライン (soil line) とは、横軸に赤域 (Red) の反射率を、縦軸に近赤外域 (NIR) の反射率をとった Red-NIR 空間上の土壌の点群にたいし、回帰した直線のことである。土壌が乾燥から湿潤へと変化すると、土壌の点はソイルラインに沿って原点に近いほうに移動する。ただし、ソイルラインは通常、原点を通る直線とはならない。

1.2.1 反射スペクトルの赤および近赤外バンドを利用する植生指数

上述のように、NDVI は、健全で LAI の高い植生の樹冠反射率が、ストレスを受けたものや LAI の低いものと比べて、赤域で低く、近赤外域で高いことを利用した植生指数である。赤バンドと近赤外バンドを利用したこのタイプの植生指数は、これまでもっとも広く使われており、さまざまな改良が重ねられた結果、多くのバリエーションが

表 1.1 本研究で検討した既存の植生指数.

name	abbreviation	source
<i>VIs using reflectance spectra</i>		
Ratio Vegetation Index	RVI	Pearson and Miller (1972)
Difference Vegetation Index	DVI	Jordan (1969)
Normalized Differential Vegetation Index	NDVI	Rouse (1974)
Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	Kaufman and Tanré (1992)
Global Environment Monitoring Index	GEMI	Pinty and Verstraete (1992)
Renormalized Difference Vegetation Index	RDVI	Roujean and Breon (1995)
Enhanced Vegetation Index	EVI	Boegh et al. (2002), Justice et al. (1998)
Perpendicular Vegetation Index	PVI	Richardson and Wiegand (1977)
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	Huete (1988)
second version of SAVI	SAVI2	Major et al. (1990)
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	TSAVI	Baret et al. (1989), Baret and Guyot (1991)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	MSAVI2	Qi et al. (1994)
Optimized SAVI	OSAVI	Rondeaux et al. (1996)
GEneralized Soil Adjusted Vegetation Index	GESAVI	Gilbert et al. (2002)
Vegetation Vitality Ratio	VVR	野口、近津 (1995)
Water Index	WI	Peñuelas et al. (1993), Peñuelas et al. (1997)
Photochemical Reflectance Index	PRI	Gamon et al. (1992)
Chlorophyll Absorption Ratio Index	CARI	Kim et al. (1994)
index for leaf chlorophyll content	R750R700	Gitelson et al. (1996)
index for leaf chlorophyll content	R750R550	Lichtenthaler et al. (1996)
Structure-Insensitive Pigment Index	SIPI	Peñuelas et al. (1995)
Plant Senescence Reflectance Index	PSRI	Merzlyak et al. (1999)
<i>VIs using first derivative spectra</i>		
Stress Index	SI	本郷ら(1998)
First-order Derivative Green Vegetation Index derived using zero baseline	FDGVI	Elvidge and Chen (1995)
Double-Peak optical Index	DPI	Zarco-Tejada et al. (2003)
Derivative Chlorophyll Index	DCI	Zarco-Tejada et al. (2002)
the first derivative at REP	FREP	-
Red Edge Position (red-edge inflection point)	REP	-
ratio of the first derivative at 703 nm to at REP	R703REP	Boochs et al. (1990)
<i>VI using second derivative spectra</i>		
Second-order Derivative Green Vegetation Index derived using zero baseline	SDGVI	Elvidge and Chen (1995)

存在する。

まず、RVI と DVI は次式で示される NDVI 以前のもっとも古典的な指数である。単純な形式のため、植生指数のパフォーマンスを比較するときの基準のひとつとして使われることが多い。

$$RVI = \frac{R_{NIR}}{R_{RED}}$$

$$DVI = R_{RED} - R_{NIR}$$

NDVI は DVI を $R_{NIR} + R_{RED}$ により正規化した指数である。この正規化の操作によって、計測途中で照射光の強度が変化し、全体的に反射率が増加あるいは減少する影響が抑制される。NDVI は、現在でももっともよく利用される植生指数であるが、土壌バックグラウンドの影響を受けやすい (Huete, 1988)、比較的低い LAI (2~3 程度) で直線的な反応が弱まり始め、LAI (3.5~6 程度) で値が飽和してしまう (Carlson and Ripley, 1997; Luo et al., 2002; Pontauiller et al., 2003)、大気の影響を受けやすい (Pinty and

Verstraete, 1992) という欠点が知られている。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

ARVI は大気の影響を受けにくい指数として提案された MODIS のための植生指数である。赤、近赤外バンドのほかに、青バンドを利用しており、同様のバンドをもつセンサー、例えば Landsat/TM でも利用することができる。

$$ARVI = \frac{R_{NIR} - (2 \cdot R_{RED} - R_{BLUE})}{R_{NIR} + (2 \cdot R_{RED} - R_{BLUE})}$$

GEMI は大気の影響を受けにくい非線形植生指数であり、NOAA/AVHRR による地球規模の生物圏のモニタリングを目的として開発された。

$$GEMI = \mu \times (1 - 0.25 \cdot \mu) - \frac{R_{RED} - 0.125}{1 - R_{RED}}$$

$$\mu = \frac{2 \times (R_{NIR}^2 - R_{RED}^2) + 1.5 \cdot R_{NIR} + 0.5 \cdot R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + 0.5}$$

RDVI は DVI と NDVI のハイブリッドである。DVI は植被率が低い場合に、NDVI は植被率が比較的高い場合にそれぞれ適した指数であるが、RDVI はこれらの特長を兼ね備えた指数として考案された。

$$RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI} = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{\sqrt{R_{NIR} + R_{RED}}}$$

EVI は大気の影響および樹冠下の土壌バックグラウンドの影響を最小限に抑えるとともに、植生に関する情報を改善する指数として提案された。 G はゲインファクター、 L はバックグラウンド効果の補正係数、 C_1 および C_2 はエアロゾルによる影響の補正係数である。

$$EVI = \frac{G \times (R_{NIR} - R_{RED})}{L + R_{NIR} + C_1 \cdot R_{RED} - C_2 \cdot R_{BLUE}}$$

$$L = 1; G = 2.5; C_1 = 6; C_2 = 7.5$$

PVI は Red-NIR 空間上において群落密度の等しい植生の点を結んだ直線、すなわち植生等値線 (vegetation isoline) がソイルラインと平行になると仮定する植生指数である。つまり、ある植生の点からソイルラインまでの距離が PVI の値である。

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \times (R_{NIR} - a \cdot R_{RED} - b)$$

SAVI は土壌バックグラウンドの影響を抑えるために提案された指数で、LAI が低い

場合に利用される植生指数である。 L はバックグラウンド効果の補正係数であり土壌により 0 から 1 の値をとるが、通常は定数 0.5 を使用する。SAVI は、Red・NIR 空間において原点に存在する NDVI の植生等値線の交点を、第 3 象限へ平行移動させた指数である。このときソイルラインの傾きは 1 であると仮定され、植生等値線の交点は Red および NIR 方向へ等距離移動される。しかし実際は、多くの土壌で、ソイルラインの傾き a は 1.1~1.4、ソイルラインの切片 b は 0.02~0.07 の範囲の値をとる。したがって、SAVI は厳密にはややことなるソイルラインを仮定していることが多く、ソイルラインの係数が $a = 1$ および $b = 0$ で裸地の場合のみに真に正しい値を返す指数である (Baret et al., 1989) と言える。

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + L} \times (1 + L)$$

$$L = 0.5$$

SAVI2 は SAVI の改良型である。植生の近赤外バンドの反射率は赤バンドの反射率の線形関数として表現できるという事実をもとに提案された。ソイルラインの係数 a および b の比 b/a がバックグラウンド効果の補正係数である。

$$SAVI2 = \frac{R_{NIR}}{R_{RED} + \frac{b}{a}}$$

TSAVI はソイルラインの特性に応じてバックグラウンド補正係数が調節されるように考慮された SAVI の改良型指数であり、LAI が非常に低いときに有効な指数として提案された。TSAVI は Red・NIR 空間において植生の点とソイルラインの切片を結んだ直線と、ソイルラインのなす角度を表している。 X は土壌の効果を最小限に抑えるための係数である。

$$TSAVI = \frac{a \cdot (R_{NIR} - a \cdot R_{RED} - b)}{a \cdot R_{NIR} + R_{RED} - a \cdot b + X \cdot (1 + a^2)}$$

$$X = 0.08$$

MSAVI2 は SAVI のバックグラウンド効果補正係数 L の値を反復解法により決定する関数を指数の中に取り込んでいる。したがって、補正係数 L は式の中に現れない。

$$MSAVI2 = \frac{(2 \cdot R_{NIR} + 1) - \sqrt{(2 \cdot R_{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (R_{NIR} - R_{RED})}}{2}$$

OSAVI は SAVI の乗算係数 $(1 + L)$ を除いた形にした上で、樹冠反射スペクトルのシミュレーションモデル SAIL を利用して、最適なバックグラウンド効果補正係数 Y を

求めたものである。

$$OSAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + Y}$$

$$Y = 0.16$$

GESAVI は簡単な樹冠反射モデルから導かれた指数で、 Z は土壌のバックグラウンド効果を抑制するための係数である。

$$GESAVI = \frac{R_{NIR} - a \cdot R_{RED} - b}{R_{RED} + Z}$$

$$Z = 0.35$$

VVR は、赤バンドが近赤外バンドに比べてクロロフィルの影響を強く受けていることを利用した植生の活力度を表す指数である。Red-NIR 空間上の植生の点から、横軸（赤バンドの反射率）と平行な線をソイルラインに向かって延ばし、その交点と植生を表す点までの距離と、交点から縦軸（近赤外バンドの反射率）までの距離の比によって、植生の活力度を表した指数である。

$$VVR = 1 - \frac{a \cdot R_{RED}}{R_{NIR} - b}$$

1.2.2 反射スペクトルを利用するその他の植生指数

水分子の吸収バンドを利用し、渇水ストレスにともなう葉内水分量の変化を直接計測することは難しい。なぜなら、大気中の水分子による吸収の不確定な影響が大きすぎるからである。WI は、このような問題にたいし、弱い水の吸収バンドであれば大気の影響は少ないと考え、950～970 nm 付近にある水の吸収バンドを利用する。例えば、葉内水分量が多い場合は、970 nm における吸収率が増加し、反射率が低下するので、WI は大きな値を示す。

$$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$$

PRI は、光合成における余剰光の消散プロセスが 531 nm 付近における吸収の変化と関係していることを利用した、光合成における光利用効率を表す指数である。

$$PRI = \frac{R_{570} - R_{531}}{R_{570} + R_{531}}$$

CARI は、個葉レベルではクロロフィル濃度が変化しても 550 nm と 700 nm における反射率の比が変わらないことを利用した、光合成有効放射吸収量を推定するためのク

クロフィル吸収率指数である。CAR はクロフィルによる吸収が顕著な波長 (670 nm) の反射率と、550 nm および 700 nm の反射率を結んだ直線との間の距離を表す。

$$CARI = CAR \cdot \frac{R_{700}}{R_{670}}$$

$$CAR = \frac{|A \times 670 + R_{670} + B|}{\sqrt{A^2 + 1}}$$

$$A = \frac{R_{700} - R_{550}}{150}$$

$$B = R_{550} - A \times 550$$

R750R700 および R750R550 は、個葉レベルにおけるクロフィル濃度計測のための指数である。葉のクロフィル濃度計測において、これらの指数は NDVI よりも約 6 倍広いダイナミックレンジをもつ (Lichtenthaler et al., 1996)。

$$R750R700 = \frac{R_{750}}{R_{700}}$$

$$R750R550 = \frac{R_{750}}{R_{550}}$$

SIPI は個葉レベルにおけるカロテノイド/クロフィル a 比計測のための指数である。青域ではカロテノイドおよびクロフィルとも吸収率が高いが、赤域ではクロフィルのみが吸収することを利用している。

$$SIPI = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} - R_{680}}$$

PSRI は葉の老化にともなう葉内色素の変化を表す指数である。カロテノイドおよびクロフィルの比が、678 nm と 500 nm における反射率の差に影響を与えていることを利用している。

$$PSRI = \frac{R_{678} - R_{500}}{R_{750}}$$

1.2.3 1 階微分スペクトルを利用する植生指数

レッドエッジとは、可視域から近赤外域にかけて急激に反射スペクトルが変化するおよそ 670~780 nm の領域のことである。この領域の 1 階微分スペクトルはひとつのはっきりとしたピークをなしている。レッドエッジピークの最大値や、その波長は、レッドエッジの特徴を表す主要なパラメーターであり、植生のストレスや LAI と関係が

あることが知られている。本研究では、1 階微分スペクトルにおけるレッドエッジピークの最大値を FREP、その波長を REP と定義した。

SI は樹木の渇水ストレスを計測するための指数として提案された。ストレスを受けると、レッドエッジピークが短波長側に移動し（ブルーシフト）、ピークの高さが低くなることを利用している。

$$SI = \frac{F_{701}}{F_{710}}$$

FDGVI は 626～795 nm までの 1 階微分値の絶対値を積分した指数である。LAI が低くなると 1 階微分スペクトルの谷の深さやピークの高さが減少することを利用して

$$FDGVI = \sum_{\lambda_i=626}^{795} |F_{\lambda_i}| \cdot \Delta\lambda_i$$

DPI および DCI は、ストレスを受けていない植生ではレッドエッジピークの先端がさらに 2 つのピークに分かれていることに着眼したストレスを表す指数である。

$$DPI = \frac{F_{688} \times F_{710}}{F_{697}^2}$$

$$DCI = \frac{F_{705}}{F_{722}}$$

R703REP は、703nm における 1 階微分値がクロロフィルのみの影響を受けているのにたいし、FREP はクロロフィルと LAI の影響を受けているという考察から提案された植生指数で、おもにバイオマスに関係すると考えられている指数である。

$$R703REP = \frac{F_{703}}{FREP}$$

1.2.4 2 階微分スペクトルを利用する植生指数

SDGVI は 626～795 nm までの 2 階微分値の絶対値を積分した指数である。LAI が低くなると 2 階微分スペクトルの谷の深さやピークの高さが減少することを利用して

$$SDGVI = \sum_{\lambda_i=626}^{795} |S_{\lambda_i}| \cdot \Delta\lambda_i$$

1.2.5 まとめ

既存の植生指数の特徴を、計算の単純さ、マルチスペクトルデータ（例えば、Landsat/TM）への適用可能性、ソイルラインの情報の不必要性、植生ストレスの計測に特化した機能の有無、大気効果の最小化機能の有無、土壌バックグラウンド効果の最小化機能の有無の観点からまとめて表した（表 1.2）。ただし、ここにあげたすべての指数について、そのパフォーマンスを多様な条件で比較した研究成果は存在しないことから、ここでは、提案時に意図された指数の特徴、あるいは、すでに理論的あるいは実証的に十分に明らかとなっている指数の特徴について示した。

NDVI をはじめとする、反射スペクトルの赤および近赤外バンドを利用する植生指数は、マルチスペクトルデータへの適用が可能であり、ほとんどの場合、計算が単純であるところに特徴がある。ARVI や GEMI は大気の影響を最小化し、RDVI や SAVI、SAVI2、TSAVI など SAVI の名前のつく指数は土壌バックグラウンド効果を最小化する。また、EVI は大気と土壌バックグラウンドの両方の影響を最小化する。MSAVI2 および OSAVI を除く SAVI の名前がつく指数では、ソイルラインの情報が必要である。赤バンドと近赤外バンドを利用した植生指数のバリエーションは多いが、これらの指数の評価は未だに定まっておらず、さまざまな条件下でパフォーマンスを比較する研究が進められているところである（例えば、Leprieur et al., 1996; Bannari et al., 1996; Broge and Leblanc, 2000; Xiao et al., 2003）。

植生ストレスの計測に特化した植生指数は、VVR、WI、SI、DPI、DCI である。ただし、これらの指数でも、樹冠の粗密度の影響を受けないという保証はない。本研究では、渇水ストレスと樹冠の粗密度の影響についての結果を第 3 章に示した。

微分スペクトルを利用する指数は、反射スペクトルをスムージングした上で、差分処理の必要があり、計算量をやや必要とする。しかし、第 3 章で述べるように、微分スペクトルは土壌のバックグラウンドの影響を軽減するというメリットをもつ。さらに REP は、波長の位置を利用するので、大気の影響を受けにくいことが知られている（Baret et al., 1992）。

植生ストレスの計測のための指数や、微分スペクトルを利用する指数に関する蓄積は、赤および近赤外バンドを利用した植生指数と比較するときわめて少なく、実用に供することができる指数が開発されているとは言えない。次章以降に、植生渇水ストレス指数の開発を目的とした実験の結果について論じた。

表 1.2 既存の植生指数の特徴

	calculation simplicity	applicability to multispectral data	unnecessity of soil line information	specialized function to detect vegetation stress	specialized function to minimize atmospheric effect	specialized function to minimize soil background effect
RVI	○	○	○	×	×	×
DVI	○	○	○	×	×	×
NDVI	○	○	○	×	×	×
ARVI	○	○	○	×	○	×
GEMI	△	○	○	×	○	×
RDVI	○	○	○	×	×	○
EVI	○	○	○	×	○	○
PVI	○	○	×	×	×	×
SAVI	○	○	×	×	×	○
SAVI2	○	○	×	×	×	○
TSAVI	△	○	×	×	×	○
MSAVI2	△	○	○	×	×	○
OSAVI	○	○	○	×	×	○
GESAVI	○	○	×	×	×	○
VVR	○	○	×	○	×	×
WI	○	×	○	○	×	×
PRI	○	×	○	×	×	×
CARI	△	×	○	×	×	×
R750R700	○	×	○	×	×	×
R750R550	○	×	○	×	×	×
SIP1	○	×	○	×	×	×
PSRI	○	×	○	×	×	×
SI	△	×	○	○	×	○
FDGVI	×	×	○	×	×	○
DPI	△	×	○	○	×	○
DCI	△	×	○	○	×	○
FREP	×	×	○	×	×	○
REP	×	×	○	×	○	○
R703REP	×	×	○	×	×	○
SDGVI	×	×	○	×	×	○

○: relatively simple
△: intermediate
×: relatively complex

○: applicable
×: inapplicable

○: unnecessary
×: necessary

○: specialized
×: no specialized

○: specialized
×: no specialized

○: specialized
×: no specialized

第2章 熱慣性特性値 (TRN) および代替熱慣性特性値 (ATRN) による植生渇水ストレスの計測

2.1 背景と目的

植物に渇水ストレスがかかると、蒸散速度が低下し、渇水ストレスのない植物に比べて葉温が高くなる。熱情報を用いた植生渇水ストレスの把握は、このような蒸散と葉温の関係を利用する。本研究では、航空機や衛星の熱バンドを利用し、広域の植生渇水ストレス状態を測定することができる指標として、熱慣性特性値 (thermal response number, TRN) (Luvall and Holbo, 1989) が有効ではないかと考え、採りあげた。なぜなら TRN は、クロロフィル吸収帯と近赤外の反射特性にもとづく各種の植生活力度指数とことなり、クロロフィルの影響を受けずに蒸散を介して渇水ストレスの影響を評価できる可能性があるからである。次式に示すように、TRN は入力放射エネルギーにたいする地表面温度の変化を表す地表面の熱慣性指標である。

$$TRN \text{ (J m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}) = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} R_n \cdot \Delta t}{T_{s2} - T_{s1}} \quad (2.1)$$

R_n : 純放射量 (W m^{-2})

Δt : 純放射量測定の間隔時間 (s)

T_{s1} : 時刻 t_1 における地表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_{s2} : 時刻 t_2 における地表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

TRN の分子は時刻 t_1 および t_2 間の積算純放射量 (J m^{-2})、分母は同時刻間の地表面温度の差である。

これまでに、航空機から約 30 分間隔で森林地表面温度を計測し、TRN により森林タイプの分類を行った研究 (Luvall and Holbo, 1989)、温帯広葉樹林の TRN の季節的変化と葉の蒸散活動の変化に言及した研究 (Moore et al., 1996)、航空機搭載センサーにより大規模緑化地を午前と午後の 2 回観測を行い、緑化良好地の TRN が不良地のそれに比べ高いことを示した研究 (Njoroge and Morimoto, 1999) があり、理論上 TRN が植物の蒸散活動と関係し、植生渇水ストレス状態を把握する指標となる可能性が示唆されてきた。しかし、これを実験的に検証した研究はまだなく、TRN には NDVI 等の植生指数や単なる葉温による評価と比較し、未解明の点が多く残されている。

2 回計測することが必要な TRN は、データ取得経費がその分だけ嵩むことになる。また、比較的高い空間解像度をもつ熱赤外センサーを搭載する現行の衛星は観測周期が

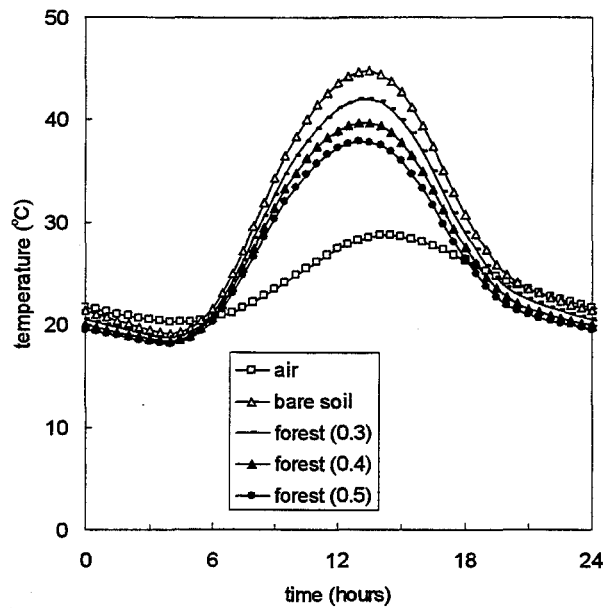


図 2.1 森林および裸地の地表面温度と気温の平均的な夏の日変化。森林のアルベドを 0.2、蒸発効率を 0.3、0.4、0.5、裸地のアルベドを 0.2、蒸発効率を 0.2 に設定し、近藤（1992）の方法により平均的な夏の日変化をシミュレートした。

十数日であるため、同一のセンサーにより 1 日のうちに 2 回データを取得することが基本的に不可能である。このため、TRN を変更した代替熱慣性特性値（alternative thermal response number, ATRN）を考案し、衛星あるいは航空機による観測数を 1 回に減らすことを検討した。ATRN は、夜明けからしばらくして（本研究では 30 分後とした）気温、地温および葉温がほぼ同温度になることに着目し、TRN の 1 回目の地表面温度の観測値を同時刻の気温によって代替することにより算出する。なお、近藤（1992）の方法によって、夏の平均的な地表面温度の日変化をシミュレートした結果から、夜明けからしばらくして気温、裸地および森林の地表面温度がほぼ同温度（誤差 ± 0.6 °C 程度）になることがわかる（図 2.1）。

以上の背景のもと、TRN と ATRN の植生渇水ストレス指数としての有効性を検証するための実験を行った。また、衛星・航空機センサーの精度にもとづく TRN と ATRN の相対精度を数値シミュレーションによって検討した。

2.2 方法

材料には、アラカシ (*Quercus glauca* Thunb.) とコナラ (*Quercus serrata* Thunb.) の 3 年生実生を用意した。2002 年 8 月 2 日、12 日、16 日、20 日からは、灌水を停止

する鉢を設け、4段階の渇水ストレスを設定した。また、コントロールとして灌水を続けた苗を用意した。

実験は京都大学大学院農学研究科附属演習林本部試験地 (N 35° 02', E 135° 47') において 2002 年 8 月 11 日と 23 日に行った。8 月 11 日には、各地表要素 (日向の葉、日陰の葉、日向の土、日陰の土) の温度と被覆率から群落温度が推定できるかどうかを検証する実験を行った。まず、3 段階の LAI をもつ模型群落を作成するために、灌水を続けていたアラカシとコナラから 9 鉢、4 鉢あるいは 1 鉢の苗を抜き出し、上面が 80 × 80 cm の木箱に均等に配置し、鉢の隙間に土を入れ、表面に自然乾燥した赤玉土を約 3 cm 厚で敷き詰めた。また、鉢を入れずに表面に赤玉土を約 3 cm 厚で敷き詰めた木箱をもう 1 つ作成した。これらの木箱は、一日中、日の当たる場所に設置した。

午前 8 時から午後 4 時まで約 1 時間おきに、ポータブル放射温度計 THI-500 (TASCO) を用いて、模型群落の 90 度真上 (地上約 2.5 m) から群落の温度を、土だけの木箱の上から日向の地温を、30 サンプルずつ測定した。また、ほぼ同じ位置からデジタルカメラ (画角約 62 度) によって群落の画像を記録した。各群落の LAI は、測定後にすべての葉を刈り取り、デジタルスキャナーで読み取ることにより計測した。

隣接する場所においては、灌水を続けていたアラカシとコナラの苗を日向と日陰 (低木の陰) に、赤玉土を入れた鉢を日陰 (低木の陰) に設置し、日向・日陰の葉温および日陰の地温を直径 0.1 mm の銅・コンスタンタン熱電対を用いて、4 サンプルずつ計測し、30 秒おきに記録した。

デジタルカメラ画像は、画素の RGB 輝度値を用いて各地表要素に自動分類した後、目視確認を行い、被覆率を求めた。

8 月 23 日には、日向・日陰の葉温および地温を、灌水を停止した苗についても同様の方法で測定した。また、屋上に設置した高精度放射収支計 CNR1 (Kipp & Zonen Inc., Saskatoon, Canada) により、下向き短波および長波放射量を 10 秒おきに測定し、平均値を 5 分おきに記録した。

各樹種各ストレス状態の苗について、以下の測定を行った。蒸散速度は、各状態の苗を 2 個体ずつ選び出し、ポロメーター LI-1600 (LI-COR, Lincoln, U.S.A.) により測定した。夜明け前の木部圧ポテンシャルは、各 3 個体の頂部の枝を切り取り、プレッシャーチャンバーにより測定した。土壌マトリックポテンシャルは、100ml 土壌試料円筒に 2 サンプルずつ (コントロールについては 3 サンプルずつ) 土壌を採り、加圧板法により求めた。

表 2.1 TRN、ATRN の相対精度のシミュレーションに用いた雑音等価温度および絶対温度精度.

sensor	platform	noise equivalent differential temperature (°C)	absolute accuracy of temperature (°C)
Landsat 7 /ETM+	satellite	0.5	±1.0
Terra/ASTER	satellite	0.3	±0.6
TABI ^{a)}	aircraft	0.1	±0.5 ^{b)}

a) Thermal Airborne Broadband Imager (ITRES Inc., Colorado, USA)

b) estimated value based on Nonaka et al. (2002)

以上の測定から、積算純放射量と葉温あるいは群落温度の変化を求め、式(2.1)により TRN を求めた。ただし、純放射量 R_n (W m^{-2}) は式(2.2)により求め、アルベド α は 0.2、射出率 ε は 0.97 とした。

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - \varepsilon(\sigma T_s^4 - R_l) \quad (2.2)$$

R_s : 下向き短波放射量 (W m^{-2})

R_l : 下向き長波放射量 (W m^{-2})

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T_s : 地表面温度 (K)

TRN に関しては、2 回の測定時刻の間隔を 30 分と 1 時間に固定して求めた TRN(1800s)と TRN(3600s)のほか、5:50 に 1 回目の観測時刻を固定し時間を変化させる TRN(dawn)を求めた。ATRN は、夜明け後、地表面温度と気温がほぼ一致する時刻の気温を 1 回目の観測値とみなし、TRN(dawn)と同様に時間を変えて、式(2.1)により求めた。ただし、群落レベルの TRN、ATRN は、群落温度が得られたのが 8:00 から 16:00 であったことから、TRN(1800s)、TRN(3600s)、ATRN についてのみ求めた。

以下に示す結果の TRN、ATRN の時刻は、2 回目の観測時刻により表した。例えば、7:00 の TRN(3600s)は、6:00 から 7:00 までの観測により算出された TRN のことを指す。

また、Landsat7/ETM+、Terra/ASTER、TABI と同等の精度を持つセンサーを想定し、各センサーの TRN、ATRN の相対精度をシミュレートした。具体的には、アルベドを 0.2、蒸発効率を 0.4 とし、夏の平均的な森林の地表面温度と放射量の日変化を近藤 (1992) に従い求めた上で、射出率を 0.97 とし、地表面温度の測定誤差にともない生じる TRN、ATRN の相対精度を算出した。地表面温度の誤差に設定した値は、表 2.1

の通りである。ATRN に用いた夜明け頃の地表面温度の推定誤差は ± 0.6 °Cとした。そして、渇水ストレスなし・ありの処理を行った模型群落の TRN、ATRN の差が、TRN、ATRN の相対精度よりも大きく、リモートセンシングにより植生の渇水ストレスの有無を識別できるかについて検討を行った。

2.3 結果

2.3.1 2002 年 8 月 11 日の結果

8 月 11 日の実験により、アラカシおよびコナラの群落温度（それぞれ T_{cg} 、 T_{cs} ）を従属変数とする、次の重回帰式を得た。

$$T_{cg} = 0.987 \cdot T_{l1} \cdot C_{l1} + 1.577 \cdot T_{l2} \cdot C_{l2} + 1.190 \cdot T_{s1} \cdot C_{s1} + 2.446 \cdot T_{s2} \cdot C_{s2} - 6.252 \quad (3)$$

$$T_{cs} = 1.423 \cdot T_{l1} \cdot C_{l1} + 1.820 \cdot T_{l2} \cdot C_{l2} + 1.718 \cdot T_{s1} \cdot C_{s1} + 1.703 \cdot T_{s2} \cdot C_{s2} - 19.252 \quad (4)$$

T_{l1} : 日向の葉の温度

C_{l1} : 日向の葉の被覆率

T_{l2} : 日陰の葉の温度

C_{l2} : 日陰の葉の被覆率

T_{s1} : 日向の土の温度

C_{s1} : 日向の土の被覆率

T_{s2} : 日陰の土の温度

C_{s2} : 日陰の土の被覆率

調整済み R^2 はそれぞれ 0.967、0.959 と高く、各地表要素の温度と被覆率から群落温度を求めることができたことがわかった。各群落の LAI は、アラカシで 0.4、1.7、3.4、コナラで 0.6、2.3、4.5 であった。

2.3.2 2002 年 8 月 23 日の結果

2.3.2.1 天候

8 月 23 日は、風速、日射量とも比較的安定していた。京都地方気象台における 23 日の平均風速は 1.2 m s^{-1} 、各 10 分間の平均風速の最大値は 3.5 m s^{-1} であった。夜明けは 5:22 であり、薄い雲のかかる日で、日射量は図 2.2 のように推移した。

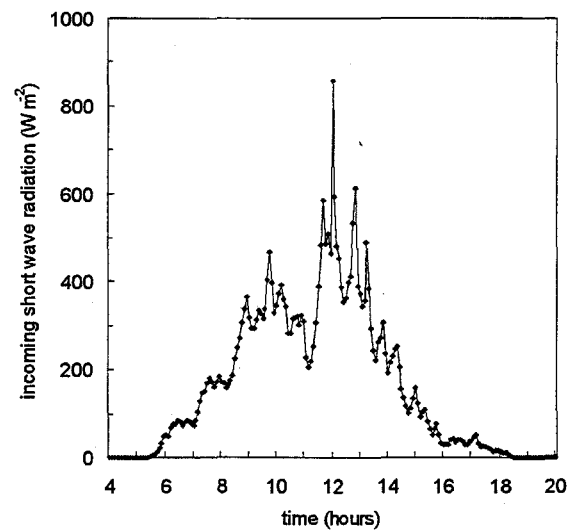


図 2.2 2002 年 8 月 23 日の日射量の変化

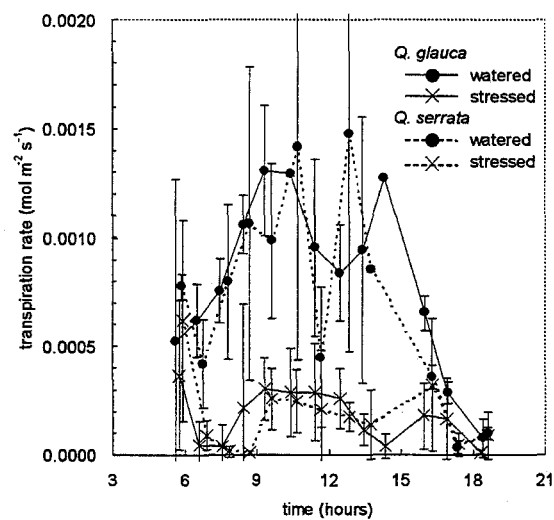


図 2.3 灌水ありおよび灌水なし処理のものとアラカシとコナラの蒸散速度（平均±SD）。

2.3.2.2 渇水ストレス状態

Bonferroni 不等式を用いた Mann-Whitney の U 検定による多重比較の結果、灌水を続けていた苗（灌水あり）と灌水を停止していた苗（灌水なし）の蒸散速度に有意な差があった（図 2.3）。しかし、灌水なし内の蒸散速度に有意な差はなかった。夜明け前の木部圧ポテンシャルは、灌水ありのアラカシが平均 -1.43 MPa、同コナラが -1.28 MPa であった。灌水なしの苗のポテンシャルは、灌水停止 3 日後のアラカシの 3 サンプル中

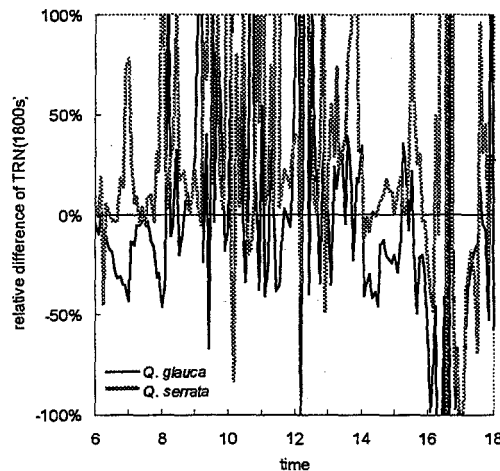


図 2.4 個葉（日向）の TRN（1800s）における灌水あり・なしの相対差の日変化。活発な蒸散により葉温が低下すれば、相対的に、灌水ありの TRN、ATRN は大きく、灌水なしの TRN、ATRN は小さな値をとるはずである。図 2.4～2.8 では、各時刻において灌水なし内で最大の TRN、ATRN、つまりもっとも灌水なしの影響が表れていなかった TRN、ATRN を、灌水ありを基準（0%）とした相対差によって表した（式： $100 \times (S_{max} - W) / W$ ，ただし S_{max} は各時刻における灌水なし内で最大の TRN、ATRN、 W は灌水ありの TRN、ATRN を表す）。0%のラインよりマイナス側にあれば、その時刻で灌水あり・なしの効果が TRN、ATRN によってうまく捉えられていたことを示す。

1 サンプルが -3.03 MPa で、残りはすべて -4.00 MPa を超えており計測不可能であった。土壌マトリックポテンシャルは、灌水ありのアラカシが平均 -3.1 kPa、同コナラが -2.9 kPa であり、圃場容水量相当の水分を保持していた。灌水なしでは、灌水停止 3 日後のアラカシが -240 kPa と有効水の範囲の水分量を保持し、残りはすべて永久萎れ点を超えていた。

以上のように、灌水あり・なし間の渇水ストレス状態には明らかな差があったが、実験前に考えていた渇水ストレス段階は設定できていなかった。このため、灌水の有無という観点から、結果を示し、分析を行った。

2.3.2.3 個葉レベルの TRN、ATRN

夜明けから 18:00 まで、灌水なしから灌水ありの葉温を引いた差は、日向ではアラカシ平均 1.0 °C、コナラ平均 0.1 °C であり、日向ではコナラの葉温の差は小さかった。一方、日陰ではアラカシ平均 0.5 °C、コナラ平均 0.7 °C であった。

個葉（日向）の TRN(1800s)は一日を通して変動が激しく、灌水あり・なしの差が

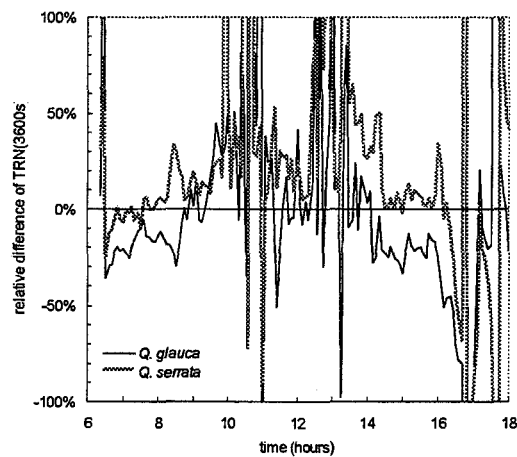


図 2.5 個葉（日向）の TRN（3600s）における灌水あり・なしの相対差の日変化（図 2.4 説明文参照）。

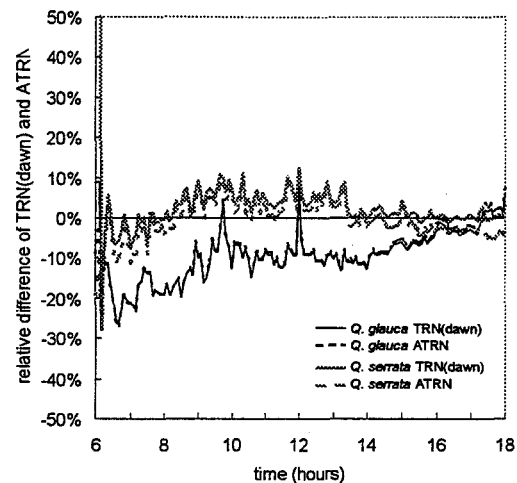


図 2.6 個葉（日向）の TRN（dawn）および ATRN における灌水あり・なしの相対差の日変化（図 2.4 説明文参照）。

わかる時間帯はほとんどなかった（図 2.4）。TRN(3600s)は TRN(1800s)に比べると変動が少なかったが、灌水あり・なしの差がわかる時間帯は依然として少なかった（図 2.5）。TRN(dawn)と ATRN はほぼ同じ結果を示した（図 2.6）。なお、ATR N の算出には、夜明け後約 30 分（5:50）ごろ、地表面温度と気温がほぼ一致していたことから、この時刻の気温（18.4 °C）を用いた。

2.3.2.4 群落レベルの TRN、ATR N

群落の TRN(1800s)および TRN(3600s)は、値が不安定であり、個葉（日向）とほぼ

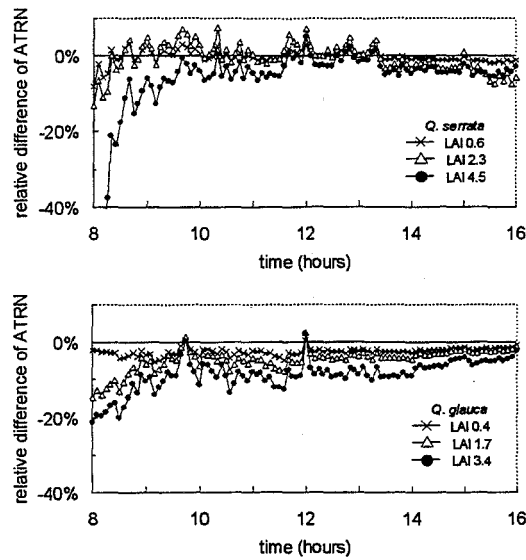


図 2.7 LAI の異なる群落の ATRN における灌水あり・なしの相対差の日変化 (図 2.4 説明文参照) .

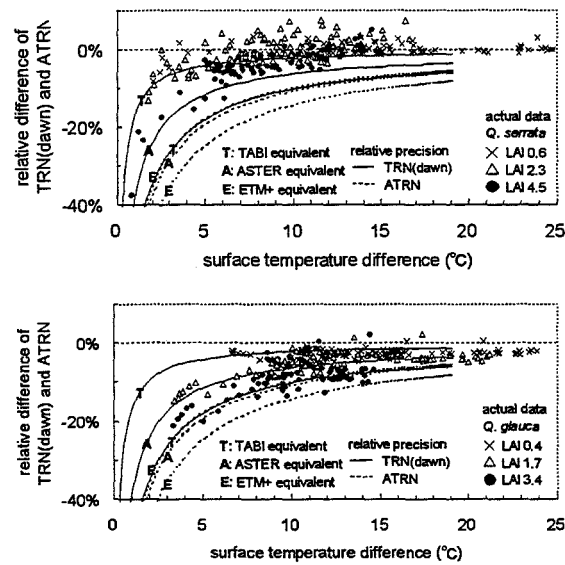


図 2.8 各センサーの TRN(dawn)、ATRN の相対精度と 8 月 23 日の実測データ (図 2.4 説明文参照) .

なる傾向があった (図 2.7)。アラカシでは、個葉 (日向) と同様に安定して灌水あり・なしの差があった。LAI4.5 のコナラ群落では、9:30 までと 13:30 以降に安定して灌水あり・なしの差が得られた。また、両樹種とも灌水あり・なしの差は、午後よりも午前のほうが大きい傾向が見られた。

2.3.3 衛星・航空機センサーの精度の考慮

図 2.8 は、シミュレーションにより求めた各センサーの TRN (dawn)、ATRN の相対精度と、8 月 23 日の実験で測定した群落レベルの ATRN のデータを重ねて表示したものである。図中の実測 ATRN は、図 2.4～図 2.7 と同様に、灌水なしのうち各時刻においてもっとも灌水なしの影響が表れていなかった ATRN を選び、灌水ありの ATRN を基準 (0%) にした相対差によって表している (図 2.4 説明文参照)。なお、TRN(dawn) は個葉レベルの結果から、ATRN とほぼ同じ値であると考えた。図 2.8 から、TABI 同等センサーによる TRN の観測により、LAI 3.4、1.7 のアラカシ群落の灌水あり・なしの区別がほぼ全時間帯で可能であることがわかった。LAI 4.5 のコナラ群落は日陰の葉の割合の少なかった 11:40～13:20 を除けば、どの時刻でも区別が可能であった。ASTER あるいは TABI 同等センサーによる ATRN の観測によっては、LAI 3.4 のアラカシ群落の灌水の有無の区別が、10 °C 以上の温度差のある午前中と午後の初め (12:45 まで) で可能であった。しかしながら、その他の群落の灌水の有無の区別は、どのセンサーによっても不可能であった。

2.4 考察

2.4.1 日射量の短時間の変化にたいする TRN、ATRN の応答

日射量の変化にたいする葉温の応答について、温室内の葉に日光を照射、遮断する実験において、葉温が 1～2 分以内に急速に一定の平衡温度に達することが示されている (Ansari and Loomis, 1959)。安定して灌水あり・なしの区別が可能であった TRN(dawn)、ATRN のアラカシの測定において、9:45 と 12:00 の 2 点だけ瞬間的に区別が不可能であったのは、地表面温度測定直前に日射量が大きく変化し、灌水ありの葉温が灌水なしと同程度にまで上昇したためであると考えられる。一方、日射量の局所的ピークが見られた 11:40 や 12:50 等でこの現象が見られなかったのは、平衡温度に達するまでの時間は長くて 2 分程度であり、一方、TRN、ATRN の計測間隔は 5 分のため、2 分より前に日射量が大きくなったとしても、葉温および TRN、ATRN の異常値として表れなかったと考えられる。

2.4.2 日射量の大きさと TRN、ATRN の安定性

23 日の天候は比較的安定していたにもかかわらず、日射量が大きくなると、葉温の分単位の変動が大きくなった。これは比較的小さな日射量の変化にたいしても葉温が敏

感に反応したことや、乱流輸送が活発になったことを表すと考えられる。この葉温の変動のため、日射量が約 300 から 400 W m² よりも大きな時間帯の TRN(1800s)と TRN(3600s)は変動が大きく、渇水ストレスの把握に有用でなかった。これに対し、TRN(dawn)は変動の小さな夜明け頃に 1 回目の観測時刻を固定することにより、TRN を安定させることに成功していた。また、ATRN も同様に夜明け頃の気温を利用することにより、ATRN を安定した指標にしていた。

2.4.3 TRN(dawn)、ATRN の応用可能性

TRN(dawn)と ATRN はほぼ同じ数値を示したが、センサーの TRN、ATRN の相対精度の観点からは TRN(dawn)のほうが植生渇水ストレスの把握のために望ましいことがわかった。これは、TRN は同じセンサーを 2 回使って測定するので、誤差は雑音等価温度となるが、ATRN は夜明けの気温とセンサーによる地表面温度の測定値を使うため、誤差がより大きな、絶対温度精度となるためである。本研究の結果から、航空機搭載の TABI 同等センサーにより TRN(dawn)を観測すれば、LAI が約 4 の植生の渇水ストレスの有無を把握することが可能であると考えられる。一方、ASTER および TABI 同等センサーによる ATRN の観測では、LAI が 3.4 で、アラカシのように渇水ストレスの違いが葉温によく表れる植生については、渇水ストレスの有無の測定が可能であるという結果が得られた。

ところで、一般に、LAI が高い群落は、空気力学的抵抗が大きいため温度による渇水ストレスの検出は難しいと言われるが、本研究では、LAI が高い群落のほうが渇水ストレスの有無を検出しやすいという結果が得られた。これは、模型群落では、乾燥した赤玉土を敷き詰めたため、土の被覆率の大きな LAI の小さい群落では、葉温よりも日向の土の温度の影響のほうが大きかったからであると考えられる。湿った土や LAI のさらに高い群落では、異なった結果が得られる可能性があり、今後の研究課題とする必要がある。

また、TRN と ATRN による渇水ストレスの把握は、今のところ相対比較によっており、同一画像内に対照とする植生が存在しない場合の判断が難しい。絶対値による渇水ストレスの有無の目安が今後必要である。また、比較しようとする区域の相対湿度や風速の条件が同じであること、微風で風速の安定した天候である必要がある。

また、観測角度の違いにより測定される群落の放射温度が異なることが知られており、同じ角度で群落を比較する必要がある。同一画像内であっても観測視野の広いセンサー

の場合は、画像の中央と端にある群落で観測角度が大きく異なる場合があるので注意が必要である。観測角度の違いによる放射温度の違いは、ナディア方向では高い温度に達している群落の下層を観測しやすくなるためであると説明されている。もしこの仮説が正しければ、観測角が水平に近くなれば、大気との熱交換が盛んな群落上部の温度の影響が多くなるため、TRNやATRNにより渇水ストレスの違いが、より顕著にあらわれるのではないかと予想される。

2.4.4 TRN(dawn)、ATRN の観測時刻

ATRN では、夜明けから約 30 分後に地表面温度と気温がほぼ一致するとして計算を行った。30 分という時間が一般性をもつのか、また、ATRN に仮定した夜明けの地表面温度の推定精度 ± 0.6 °Cが実際の森林においても妥当な数値であるのかについてさらなる検討が必要である。

TRN(dawn)の 2 回目の観測(ATRN の 1 回目の観測)については、センサーの TRN、ATRN の相対精度の観点から地表面温度差が大きいほうがよいことが示された(図 2.8)。しかし、同じ地表面温度差であっても午前は渇水ストレスの有無の区別が可能であるのに、午後になると区別が不確実になったり、確実に区別するためにはより大きな温度差が必要となる場合があった。これは、葉温の日周期の位相が日射量の位相よりもやや遅れていることがひとつの原因であると考えられる。ある蒸散速度のもとで、灌水あり・なし間に同じ温度差があったとしても、葉温の日周期の位相がやや遅れることにより、午後では温度が全体に高くなったままのため、夜明けの温度を基準とする TRN(dawn)や ATRN の灌水あり・なし間の差は相対的に小さくなっていた。実験結果から、一般に TRN(dawn)の 2 回目の観測(ATRN の 1 回目の観測)は、夜明け頃との地表面温度差が 8 °C 以上になる夏の午前中(目安として 9:00~11:30)に行うのがよいと考えられる。

また、地表面温度測定直前(2 分程度前から)の日射量の大きな変化により、TRN、ATRN が渇水ストレスの有無を正常に区別できないことがあるため、温度測定直前の日射量の大きな変化を避けて観測を行う必要がある。

2.5 まとめ

TRN(1800s)や TRN(3600s)は、変動が大きく、植生の渇水ストレスの有無を確実に把握することは難しかった。地表面温度と気温のほぼ一致する夜明け頃の気温と、

ASTER あるいは TABI 同等センサーによる 9:00～11:30 の間の観測から求められる ATRN によっては、LAI が約 4 で、渇水ストレスの違いが葉温によく表れる群落について可能であり、適用可能な植生に制限があることがわかった。航空機搭載の TABI 同等の熱赤外センサーを用いて、夜明け頃と 9:00～11:30 に 2 回の地表面温度を観測し、地上で同時測定した下向き短・長波放射量とあわせて算出される TRN(dawn)により、LAI が約 4 の植生の渇水ストレスの有無が測定できる可能性が示された。

ただし、これらの観測にあたって、観測の 2 分程度前から日射量が安定していること、同一画像内に対照とする植生が存在すること、比較しようとする区域の相対湿度や風速、観測角度がほぼ同じであること、微風で風速の安定した天候であることが必要である。

第3章 ハイパースペクトルによる植生渇水ストレスの計測

3.1 渇水ストレスにともなう微分スペクトルの変化とその特徴

3.1.1 背景と目的

ハイパースペクトルリモートセンシングは、約 1~10 nm という非常に高い波長分解能をもつセンサーによりターゲットを観測する技術である。現在、航空機搭載のハイパースペクトルセンサーとしては、AVIRIS や CASI などが運用されている。さらに、2000 年 11 月には衛星搭載ハイパースペクトルセンサー EO-1/Hyperion が打ち上げられ、この技術の実用化段階はさらに一步進んだ。一般に、数百のバンドをもつハイパースペクトルセンサーは、従来のマルチスペクトルセンサーでは難しかったターゲットの新しい特性の計測を可能にする潜在能力をもっている。例えば、Smith et al. (2002)は AVIRIS を用いて葉群中の窒素濃度から森林の生産能力を推定し、Sampson et al. (2003)は CASI により得たスペクトルデータのモデルインバージョンを行い森林のクロロフィル濃度を推定した。

ハイパースペクトルの反射データから計算される微分スペクトルは、2つの本質的な特長をもつ。それらは、定数の加算（例えば、照射光の変化）の最小化と、直線関数（例えば、直線的なバックグラウンドの反射スペクトル）の定数化、最小化である(Curran et al., 1990)。鉱質土壌のスペクトルは通常、ほぼ直線であるので、以上の特長を持つ微分スペクトルの分析は、ハイパースペクトルデータを分析するための有望な方法のひとつである。

これまで、微分スペクトルの分析においては、植生スペクトルのレッドエッジ、つまり、低い反射率の可視域とより高い反射率の近赤外域の間の、およそ 670~780 nm の急な斜面に、多くの研究者の関心が集められてきた。レッドエッジポジション (REP) と呼ばれるレッドエッジにおいて最大の傾斜をもつ波長は、レッドエッジの特徴を表すひとつの主要なパラメーターであり、後述するように多くの研究者によって調べられている。Baret et al. (1992)は、REP が土壌の光学特性、照射光の条件（太陽の位置や散乱比）、あるいは宇宙から観測する際の大気の影響から半独立的 (quasi-independent) であり、すぐれた特長をもつことを示している。

本研究では、レッドエッジにおける最大の 1 階微分値をもつ波長を「レッドエッジ領域 REP (red-edge-region REP)」または単に「REP」と呼び、レッドエッジの最初のピークにおける 1 階微分最大値をもつ波長を「第 1 ピーク REP (first-peak REP)」、2

つ目のピークにおける 1 階微分最大値をもつ波長を「第 2 ピーク REP (second-peak REP)」と呼び区別する。

REP の短波長側あるいは長波長側へのシフトは、それぞれ「ブルーシフト」あるいは「レッドシフト」と呼ばれる。シフトは、クロロフィル濃度、LAI のほか、金属、硫化物、乾燥によるストレスにともなって生じる。さらに、Baret et al. (1992)は、PROSPECT と SAIL モデルによるシミュレーションから、葉肉構造が REP に強く影響していることを示した。

単葉レベルでは、Horler et al. (1983)が REP はクロロフィル濃度、葉の生育ステージ、葉の重なっている枚数、および葉内水分量に依存していることを示した。Curran et al. (1995)は、REP によって、野外で切り離した針葉樹の葉のクロロフィル濃度の推定を、従来の研究室内の測定で得られる結果と同じくらい正確に行えると結論づけた。また、Gitelson et al. (1996)は、REP がクロロフィル濃度と強い相関をもつことを報告した。

しかしながら、樹冠レベルでは、環境ストレス、LAI およびクロロフィル濃度の指標としての REP シフトの有効性はいまだに明らかでない。Collins et al. (1983)は、硫化物の多い地域の樹木の樹冠にブルーシフトが見られたことを報告した。Rock et al. (1988)は、高いダメージを受けた樹木の枝の葉群スペクトルで REP のブルーシフトを報告したが、樹冠レベルでは統計的な有意性を発見することができなかった。Curran et al. (1990)は、切り離した枝のクロロフィル濃度と REP の直線的な関係を示したが、樹冠全体では関係を見つけることができなかった。Demetriades-Shah et al. (1990)は、個葉レベルと樹冠レベルの REP の間には弱い相関があることを示した。Filella and Peñuelas (1994)は、レッドエッジピークの形と位置がクロロフィル濃度と LAI の両方によって決定されていることを示し、樹冠レベルにおいてもレッドエッジがそれらの評価に有効であると考察した。Danson and Plummer (1995)は、LAI と REP の間に強い相関を見つけ、NDVI と相補的に REP を使うことを提案した。Broge and Leblanc (2000)は、PROSPECT と SAIL モデルを用いたシミュレーションにより、REP は LAI と弱い関係しかもっていないことを示唆した。

REP における 1 階微分値、あるいは微分スペクトルの他の波長域も研究されている。Gitelson et al. (1996)は、REP における 1 階微分値が葉のクロロフィル濃度と強い相関をもつことを示した。間野ら(1999)は、アラカシの樹冠の REP における 1 階微分値が高い渇水ストレスのもとでは減少することを発見した。Boochs et al. (1990)は、703 nm

における 1 階微分値が植物の窒素と活性状態を反映していると報告した。Demetriades-Shah et al. (1990)は、テンサイの萎黄病の推定に樹冠の反射スペクトルの 636 nm における 2 階微分値を利用することを提案した。しかし、微分スペクトルを利用した植生渇水ストレスの計測に関する研究は、REP に関する研究が多く、レッドエッジ以外の波長域についてはあまり注目されてこなかったと言える。

以上のように、微分スペクトルの分析は、照射光の影響を受けにくく、バックグラウンドにある土壌のスペクトルの影響を低減するという特長を持ち、植生域における 2 つの重要な変数、つまり渇水ストレスと LAI の計測に有効である可能性がある。しかし、樹冠レベルにおける REP シフトの指数としての有用性はいまだに明らかではない。また、微分スペクトルの研究の多くは REP に関するものであり、その他の波長域の特性はまだ十分に明らかにされていない。さらに、先行研究からは、少なくともある波長域では、渇水ストレスと LAI が反射スペクトルへ同時に影響しており、各変数を独立に計測することが難しいことが予想される。そこで、渇水ストレスを計測するために微分スペクトル分析が樹冠レベルにおいて有用であるのかを調べ、渇水ストレスおよび LAI を独立に計測するための最適なバンドを求めることを目的とした実験を行った。

3.1.2 方法

2002 年 3 月、アラカシおよびコナラの 3 年生苗のそれぞれ約 100 本を、適量の肥料を均一に混ぜあわせた用土を使って、直径約 20 cm の鉢に植え替えた。その後、1 日に 1 度十分な灌水を行い、2002 年 8 月 2 日、12 日、16 日、20 日からは 4 段階の渇水ストレスを設定するために灌水を停止した。渇水ストレスを与えた鉢に加え、コントロールとして前日に灌水を行った灌水停止 16 時間後の鉢も用意した。スペクトルの計測を行った 8 月 23 日のアラカシおよびコナラの樹高は約 1 m であった。

3 段階の LAI を設定するため、80×80 cm の 3 つの箱にそれぞれ 1、4 あるいは 9 鉢の苗を均等に隙間をあけて設置した。鉢の隙間には土を入れ、表層に自然乾燥した赤玉土（細粒）を 3 cm 厚で敷き詰めた。

5 段階の渇水ストレス（コントロールを含む）と 3 段階の LAI を組み合わせた条件下で、アラカシおよびコナラの反射スペクトルを分光放射計 SE590 (Spectron Engineering, Inc., Denver, U.S.A.)により測定した。分光放射計には、15° の視野角をもつアタッチメントをつけ、地上 3 m、ナディア方向に設置し、木箱の上面で直径約 60 cm の円の範囲を計測できるようにした。分光放射計の各バンドは約 3 nm 間隔、約

10 nm の半値幅をもつ。368.4 から 1113.7 nm のスペクトルを 1 度に 8 回計測し平均値を記録した。ターゲットの測定と交互に、ターゲットの直上に置いた 60×80 cm の BaSO₄ 標準白色板を測定し、相対反射スペクトル（以下、反射スペクトル）を求めた。ただし、不規則に入ったノイズのため、959.5 nm 以長のバンドは分析に使用しなかった。すべての測定は、35° 02' N、135° 47' E にある京都大学大学院農学研究科附属演習林本部試験地において、9:00 から 15:00 の間に行った。天候は薄曇りであったが、照射光の強度は安定していた。

アラカシとコナラの渇水ストレス状態について以下の測定を行った。まず、各渇水ストレス状態の植物から 3 サンプルの枝を採取し、夜明け前の木部圧ポテンシャルをプレッシャーチャンバー法により測定した。また、各ストレス状態の植物の 1 鉢の葉をすべて刈り取り、60℃に設定した乾燥炉で 24 時間乾燥し、次式により葉内水分量（LWC）を求めた。

$$LWC(g\ g^{-1}) = \frac{FW - DW}{FW}$$

LWC: 葉内水分量 (g g⁻¹)

FW: 生重 (g)

DW: 乾重 (g)

土壌マトリックポテンシャルは、100 ml 土壌試料円筒に 2 サンプルずつ（コントロールについては 3 サンプルずつ）土壌を採り、加圧板法により求めた。

LAI は、反射スペクトルを測定した植物のすべての葉を刈り取り、デジタルスキャナーで読み取ることにより計測した。

反射スペクトルには、3 次スプライン関数をあてはめ、低周波のノイズを低減させた。また、中央差分法により 1 階微分値、2 階微分値を求めた。これらの微分値は正しくは差分値であるが、リモートセンシングでは慣用的に微分値という言葉が用いられるためこれに従った。

レッドエッジ領域 REP、第 1 ピーク REP および第 2 ピーク REP は、1 階微分スペクトルにおいてレッドエッジ領域の最大値、第 1 ピーク、第 2 ピークの極大値を探すことにより求めた。さらに、限られた数のバンドを測定した場合でも REP を求めることができるいくつかの方法により REP を求めた。まず、Inverted Gaussian Model (IGM) へのあてはめによる方法は、上下が逆の正規分布の片半分をレッドエッジの反射スペクトルの形状に近似させる方法で、反射率 R は波長 λ の関数により表される。

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left(\frac{-(\lambda_0 - \lambda)^2}{2\sigma^2}\right)$$

ここで R_s は反射スペクトルの「肩 (shoulder)」あるいは最大値、 R_0 は反射スペクトルの最小値、 λ_0 は「ピーク吸収」波長あるいは中央の波長、 λ は波長、 σ は正規分布の裾の広がりを表すパラメーターである。REP は λ_0 と σ を定めれば求まる。このあてはめに、Bonham-Carter (1988) と Miller et al. (1990) の 2 つのことなるアルゴリズムを採用した。前者は反射データに IGM を最小二乗法によりあてはめるアルゴリズムであり、後者は 660~810 nm にスペクトルの範囲を限定し、 R_s , R_0 および λ_0 にことなる初期値を与え、 R_0 を固定し、あてはめに際し増加させる λ_0 , σ および R_s のステップに Bonham-Carter とはことなる数値を与えるアルゴリズムである。

また、Broge and Leblanc (2000) に従った 6 次多項式を反射データにあてはめる方法、Dawson and Curran (1998) の提案した 1 階微分値を利用した 3 点ラグランジュ補間法、Guyot and Baret (1988) の直線法により REP を求めた。直線法では 670、700、740 および 780 nm の 4 つのバンドが用いられる。スムージングしたデータを線形補間し、4 バンドの反射率を得たのち、Clevers et al. (2002) の方法に従い REP を求めた。REP における反射率(R_{REP})を求める式：

$$R_{REP} = \frac{(R_{670} + R_{780})}{2}$$

R_{REP} : REP における反射率

R_{670} : 670 nm における反射率

R_{780} : 780 nm における反射率

REP を求める式：

$$REP = 700 + 40 \frac{R_{REP} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$$

REP : レッドエッジポジション (nm)

R_{700} : 700 nm における反射率

R_{740} : 740 nm における反射率

渇水ストレスの強弱を表す変数としては、渇水停止時間 (water-cessation duration in hours, WD) と葉内水分量 (leaf water content, LWC) を考えた。反射、1 階微分、2 階微分スペクトルの波長にたいし、変数 (WD、LWC あるいは LAI) との相関係数(r) および偏相関係数(r_p)を計算した。偏相関係数は、第 3 あるいはそれ以上の変数の影響

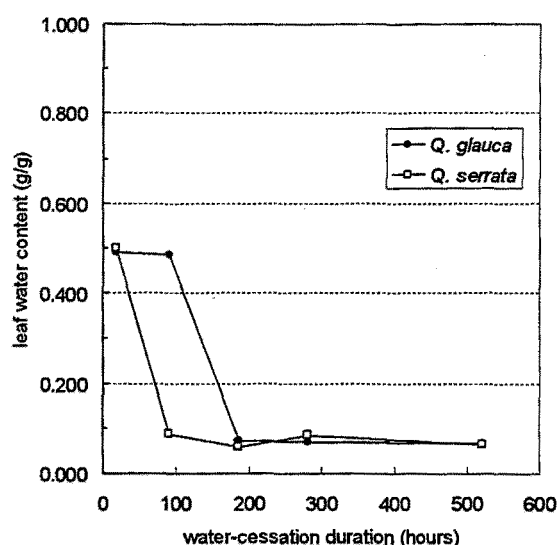


図 3.1 葉内水分量 (LWC) の時間変化.

を取り除いた、2つの変数間の相関係数のことである。例えば、ある波長においてWDとの強い相関があり、相関係数と偏相関係数の間に小さな差があれば、その波長は渇水ストレス (WD) を測定するのに望ましいことになる。このような分析により、渇水ストレス (WD あるいは LWC) と LAI を独立に計測するのに最適なスペクトル上の部分を発見することができた。実際には、相関および偏相関が強く ($|r|$ and $|r_p| > 0.800$)、第3の変数の同時的影響が小さな波長 ($|r_p \cdot r| < \text{約 } 0.050$) を選び、独立した測定のために最適なバンドを求めた。連続したバンドについては、その範囲のバンドの値を単純平均してから、相関を求めた。統計解析には R 1.6.2 および SPSS 10.0J を用い、有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

3.1.3 結果

3.1.3.1 渇水ストレス状態および LAI

LWC は、アラカシでは灌水停止 180 時間後、コナラでは灌水停止 90 時間後に、約 50% から約 8% へと急激に低下していた (図 3.1)。灌水を続けていた苗の木部圧ポテンシャルは、アラカシが平均 -1.43 MPa ($n=3$)、コナラが平均 -1.28 MPa ($n=3$) であった。灌水停止 90 時間後のアラカシ 3 サンプルのうち 1 サンプルが -3.03 MPa であったほかは、渇水ストレスがかかった植物の木部圧ポテンシャルは、すべて -4.00 MPa より小さく、プレッシャーチャンバーの計測可能範囲を超えていた。土壌マトリックポテンシャルは $\text{H}_2\text{O cm}$ の常用対数である pF により表した。灌水停止 16 時間後のアラカシおよびコ

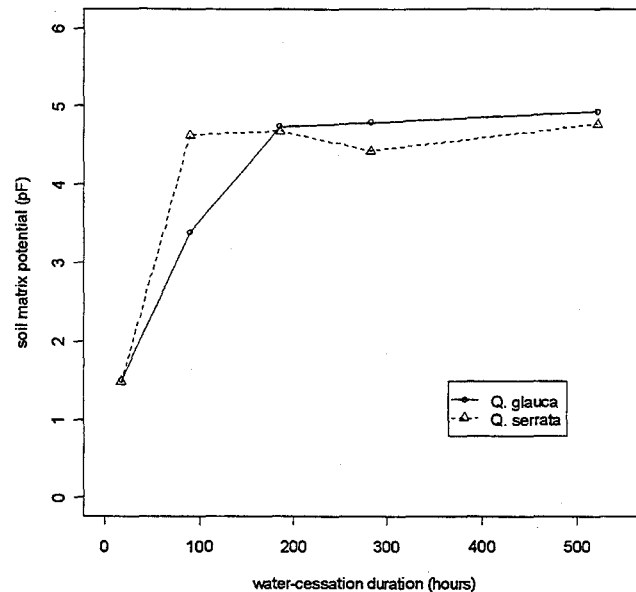


図 3.2 土壌マトリックポテンシャルの時間変化. 土壌マトリックポテンシャルの単位は pF で、 H_2O cm の常用対数である。

ナラは圃場容水量相当の水分を保持していた (図 3.2)。また、灌水停止 90 時間後のアラカシは有効水の範囲の水分量を保持していたが、残りはすべて永久萎れ点を超えていた。

3 段階の LAI の平均値はそれぞれ 0.5、2.0、4.0 であり、レンジは 0.2~0.9、1.5~2.9、3.1~5.3 であった。

3.1.3.2 スペクトル上の変化

アラカシおよびコナラ樹冠の反射、1 階微分、2 階微分スペクトルは、よく似た反応を示した。弱い渇水ストレス条件では、反射スペクトルは 3 つの特徴を持っていた。540~560 nm のピーク、680~690 nm の谷、770 nm 付近より以長の近赤外域にある「プラトー (plateau)」と呼ばれる平坦部である (図 3.3a,d)。しかしながら、強い渇水ストレスを受けている樹冠の反射スペクトルには、これらの特徴がなく、波長とともにスペクトルは単調増加した。LAI の減少によつては、徐々に谷は消え、可視域の反射率は増加し、近赤外域の反射率は減少した。

1 階微分スペクトルは 6 つの特徴を持っていた。520 nm 付近のピーク、570、615、660 nm 付近の 3 つの谷、710、730 nm 付近の 2 つの大きなピーク (レッドエッジピ

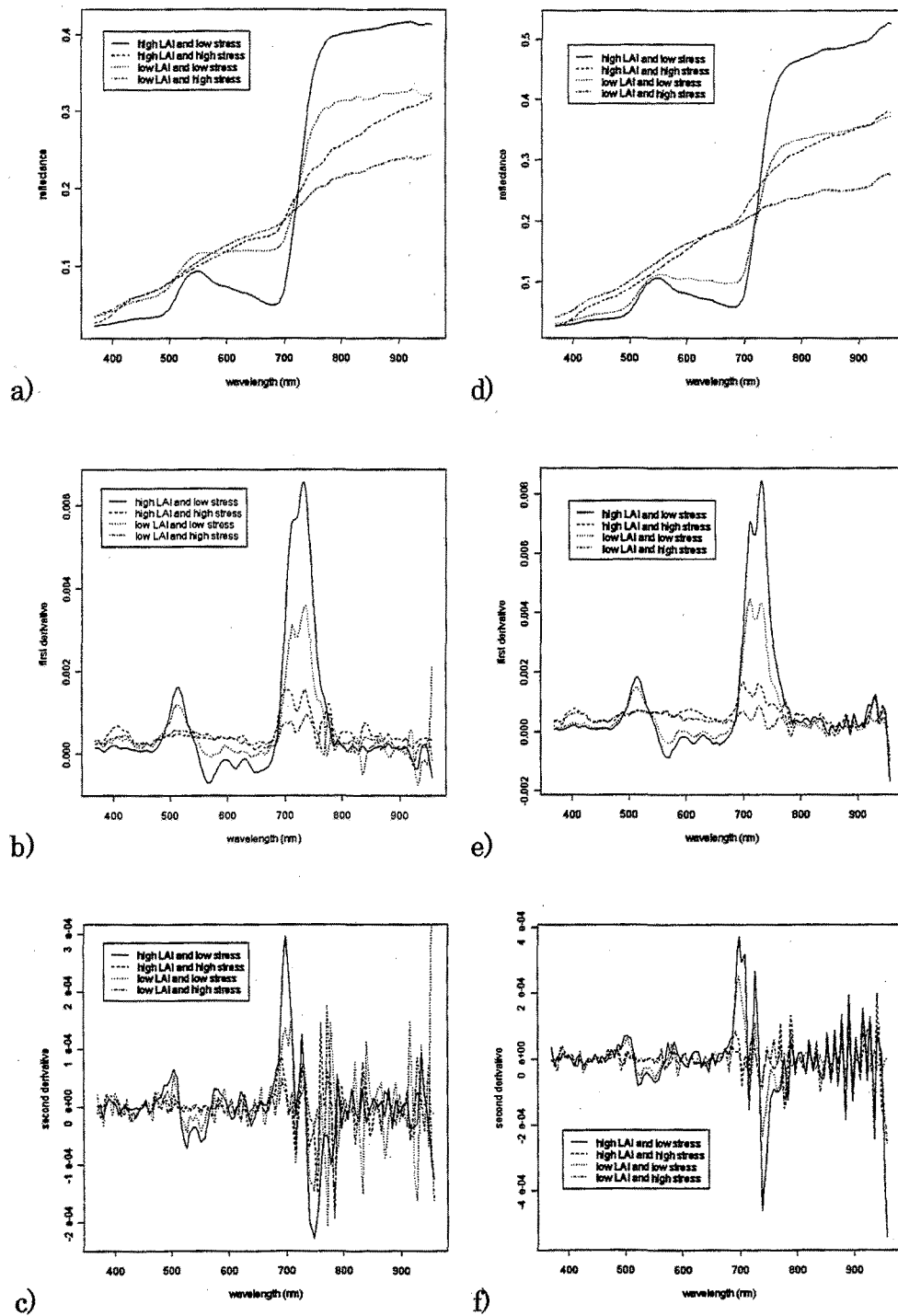
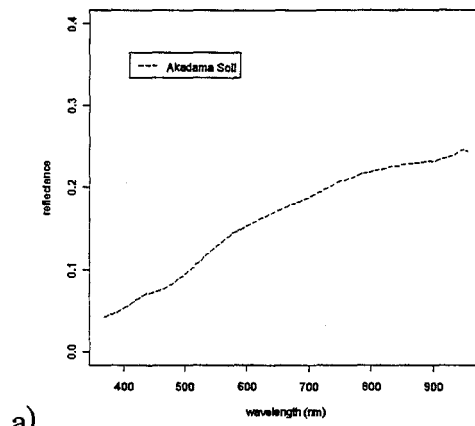
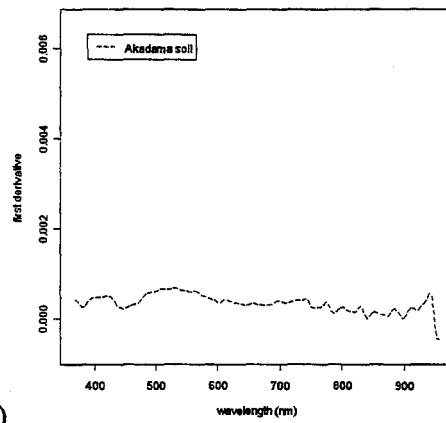


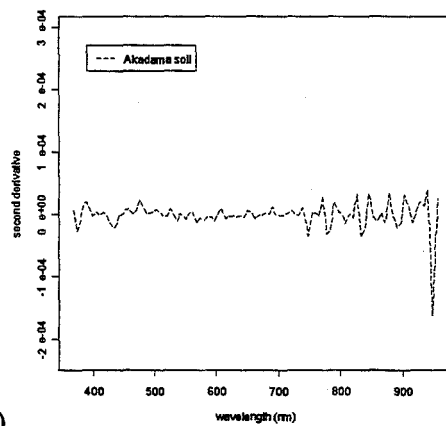
図 3.3 アラカシの a) 反射、b) 1 階微分、c) 2 階微分スペクトルとコナラの d) 反射、e) 1 階微分、f) 2 階微分スペクトルの変化。本図において LAI の高低はそれぞれ約 4.0 と約 0.5 のことを、水ストレスの強弱はそれぞれ灌水停止 522 時間後と灌水あり（灌水停止 16 時間後）のことを指す。



a)



b)



c)

図 3.4 自然乾燥した赤玉土の a) 反射、b) 1 階微分、c) 2 階微分スペクトル。スケールは図 3.2a~c のアラカシと同じ。

ーク)である(図 3.3b,e)。強い渇水ストレス条件下では、3 つの谷は消え、その 1 階微分値は負から正へと変わった。つまり、これらの波長で反射率が単調増加するようになっていた。なお、410 nm 付近のピークが強い渇水ストレス条件下であらわれたことが注目された。LAI の減少によっては、ストレスの強弱に関わらず、ピークの高さおよび谷の深さは減少した。

3 次スプライン曲線のあてはめによるスムージングにも関わらず、特に近赤外域で、不規則なピークおよび谷が 2 階微分スペクトルにあらわれた。2 階微分スペクトルには 8 つの特徴があった。500 nm 付近のピーク、525、550 nm 付近の 2 つの谷、575、620 nm 付近の 2 つのピーク、700、725~730 nm 付近のレッドエッジにおける 2 つのピーク、740~750 nm 付近の谷である(図 3.3c,f)。これらの特徴は、レッドエッジの 2 つのピークを除き、強いストレス条件下で消えた。2 階微分スペクトルの絶対値は強いストレス条件下では可視域において非常に小さな値であった。LAI の減少は、ピークの高さと谷の深さを 1 階微分スペクトルと同様に減少させた。しかしながら、強いストレス条件下における LAI の高低による違いは見た目には不明瞭であった。

3.1.3.3 土壌の微分スペクトル

自然乾燥した赤玉土の 1 階および 2 階微分スペクトルは平坦に近く、土壌のバックグラウンド効果が微分スペクトルから取り除かれていることが確認された(図 3.4)。

3.1.3.4 レッドエッジポジション

アラカシおよびコナラ樹冠のレッドエッジ領域に 2 つのピークが存在していることを確認した。レッドエッジの 1 階微分最大値をもつ波長、すなわちレッドエッジ領域 REP は 699.6~738.2 nm の範囲にあり、第 1 ピーク REP は 699.6~714.4 nm、第 2 ピーク REP は 723.4~738.2 nm の範囲にあった。

REP の相関および偏相関係数は表 3.1 に示すとおりであった。2 つの IGM あてはめ法による結果はかなり異なっていた。Bonham-Carter の REP は LWC と中程度の相関をもっていたが、Miller et al. の REP は WD と理論的に無意味な相関をもっていた(つまり、係数の符号が逆であった)。6 次多項式あてはめと直線法による REP は、LWC と中程度の相関をもっていた。3 点ラグランジュ補間法の REP は、LAI と弱い相関をもっていた。しかし、REP は 3 つの変数(WD、LWC、LAI)にたいし、ほとんどの場合で、弱い、あるいは統計的に有意でない相関を示した。さらに、すべての偏相関係

表 3.1 WD、LWC および LAI と REP の相関係数(r)および偏相関係数(r_p) ($n=30$)

	correlation coefficients (r)			partial correlation coefficients (r_p)			
	WD	LWC	LAI	WD (-LAI) [*]	LWC (-LAI) [*]	LAI (-WD) [*]	LAI (-LWC) [*]
red-edge-region REP	-0.258	0.572	-0.260	-0.257	0.568	-0.258	-0.248
first-peak REP	-0.634	0.574	0.012	-0.635	0.578	0.050	0.086
second-peak REP	0.134	0.159	0.010	0.134	0.161	0.005	0.027
IGM Bonham-Carter	-0.337	0.741	-0.076	-0.335	0.739	-0.066	-0.002
IGM Miller et al.	0.471	0.040	0.039	0.470	0.044	0.022	0.043
6th-order polynomial	-0.569	0.737	-0.053	-0.568	0.736	-0.035	0.032
Lagrangian interpolation	-0.231	0.196	0.377	-0.266	0.254	0.398	0.407
linear method	-0.390	0.670	0.131	-0.399	0.692	0.160	0.268

^{*} Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

¹⁾ Values in bold show statistical significance ($p<0.05$).

数は強くなかった($|r_p| < 0.800$)。

3.1.3.5 相関および偏相関係数スペクトル

反射スペクトルのすべての波長は、相関および偏相関係数の差が一貫して大きかったことから、少なくとも単変量指数としては、2つの変数の独立した計測に有用ではないということが明らかとなった(図 3.5)。しかしながら、1階微分および2階微分スペクトルは、独立した計測にふさわしいいくつかのバンドを含んでいた(図 3.6、3.7)。強い相関および偏相関係数をもっており($|r|$ and $|r_p| > 0.800$)、第3の変数の同時的影響が小さな波長($|r_p \cdot r| < \text{約} 0.050$)をとりあげ表 3.2 にまとめた。最良の単バンドは、WD では1階微分スペクトルの 611.4 nm、LWC では1階微分スペクトルの 519.6 nm、LAI では2階微分スペクトルの 676.0 nm であった。これらのバンドは、それぞれ、1階微分スペクトルにおける3つの谷の2つ目、緑域のピークの頂上、第1レッドエッジピークの短波長側の斜面に対応していた。最良の連続バンドは、WD では1階微分スペクトルの 599.7~617.3 nm、LWC では1階微分スペクトルの 516.8~522.4 nm、LAI では1階微分スペクトルの 687.8~693.7 nm であった。これらのバンドは、それぞれ、1階微分スペクトルにおける3つの谷のうち2つ目の短波長側の斜面、緑域のピークの頂上、第1レッドエッジピークの短波長側の斜面に対応していた。

3.1.4 考察

3.1.4.1 実験条件について

薄曇りの天候は、微分スペクトルの単変量指数の分析にはほとんど影響を与えないと考えられた。なぜなら、地上における測定であったのでセンサーとターゲットの間に存在する大気中の粒子とガスの影響はほとんど無視でき、相対反射率に変換することによ

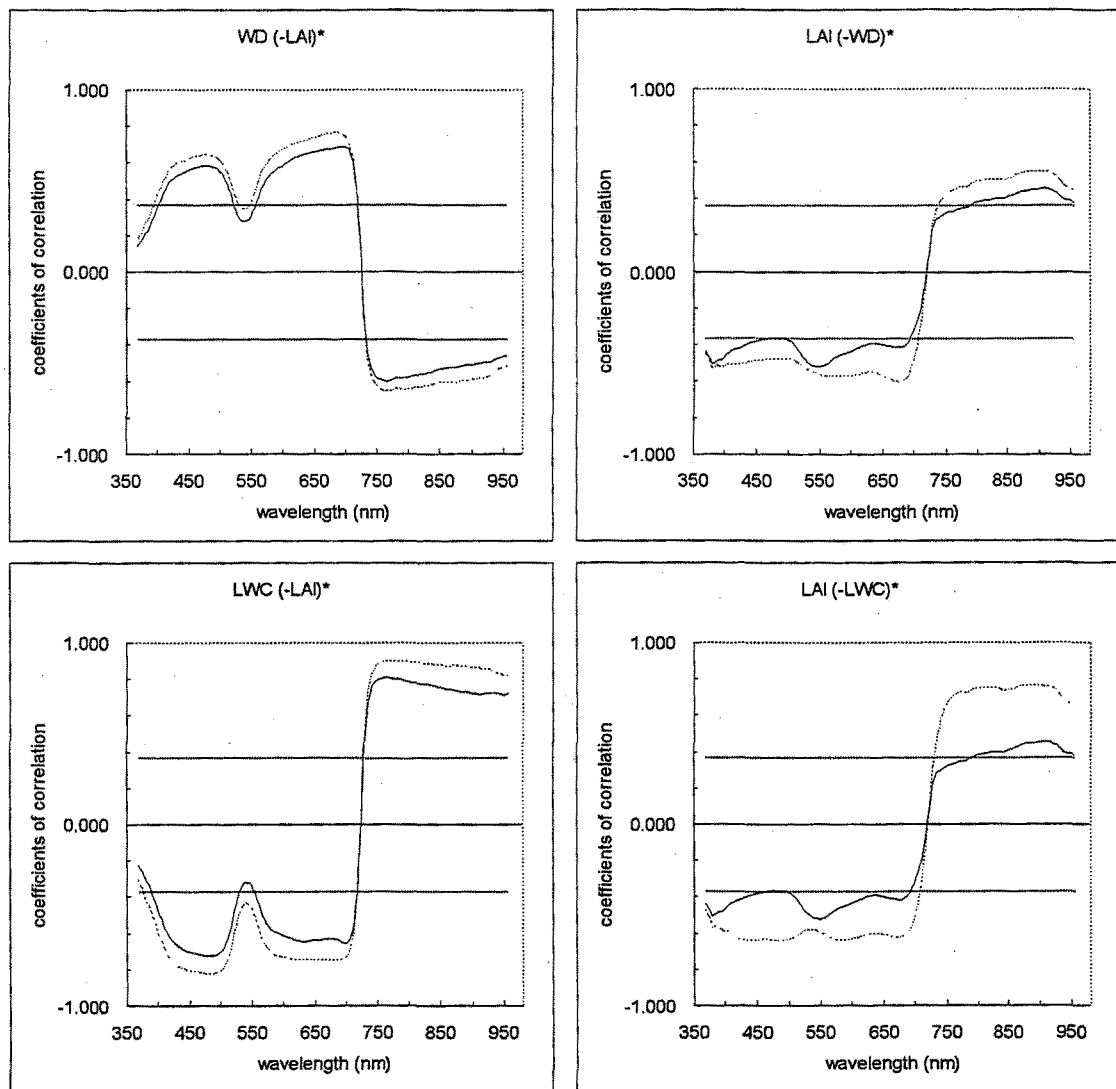


図 3.5 WD、LWC および LAI と反射スペクトルとの相関係数および偏相関係数($n=30$)。相関係数(r)は黒で、偏相関係数(r_p)はグレーで示されている。偏相関係数の統計的有意水準を水平な 2 本の線で示した($p<0.05$)。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、偏相関係数ではその影響が取り除かれたことを表す。

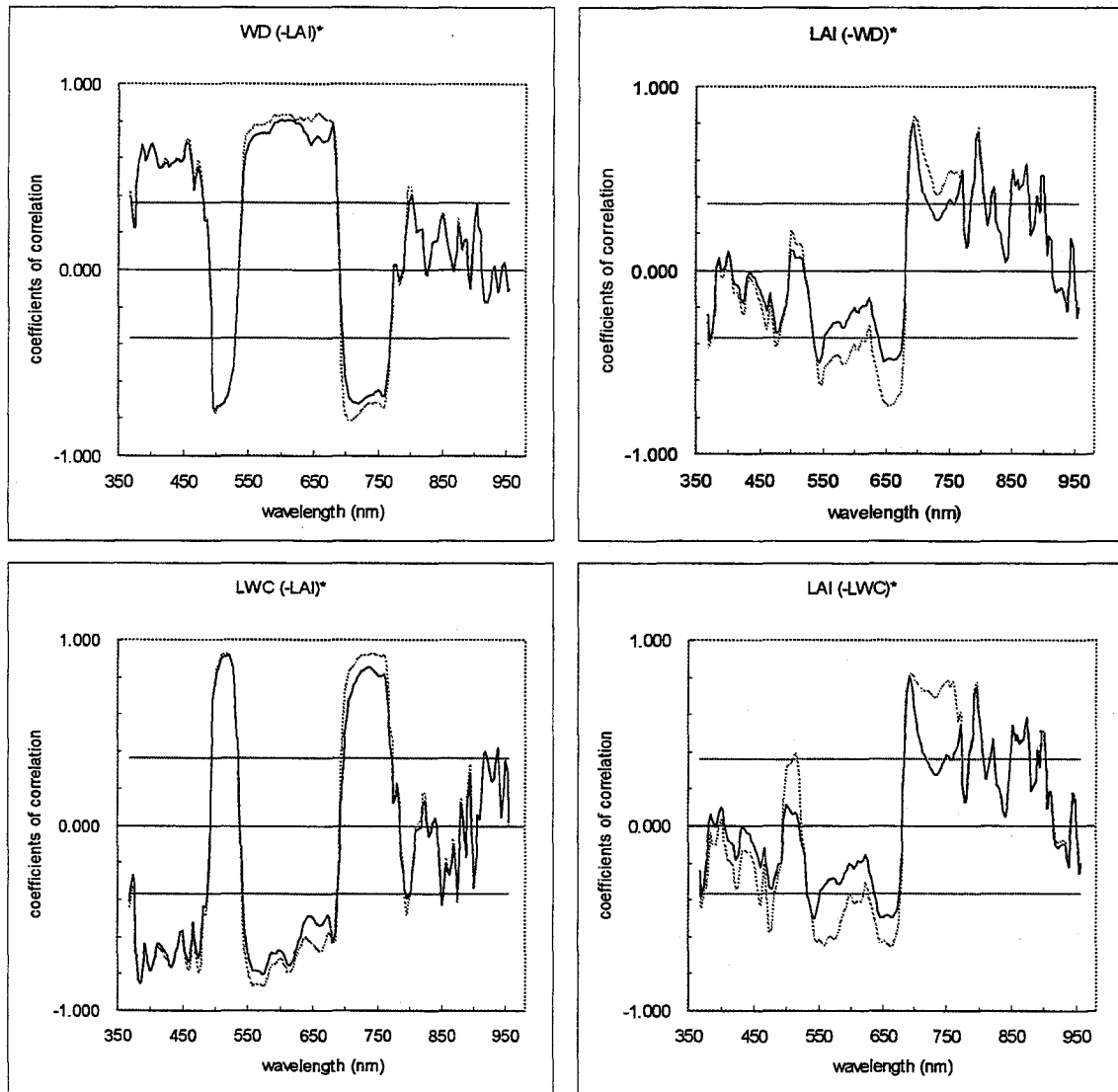


図 3.6 WD、LWC および LAI と 1 階微分スペクトルとの相関係数および偏相関係数($n=30$)。相関係数(r)は黒で、偏相関係数(r_p)はグレーで示されている。偏相関係数の統計的有意水準を水平な 2 本の線で示した($p<0.05$)。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、偏相関係数ではその影響が取り除かれたことを表す。

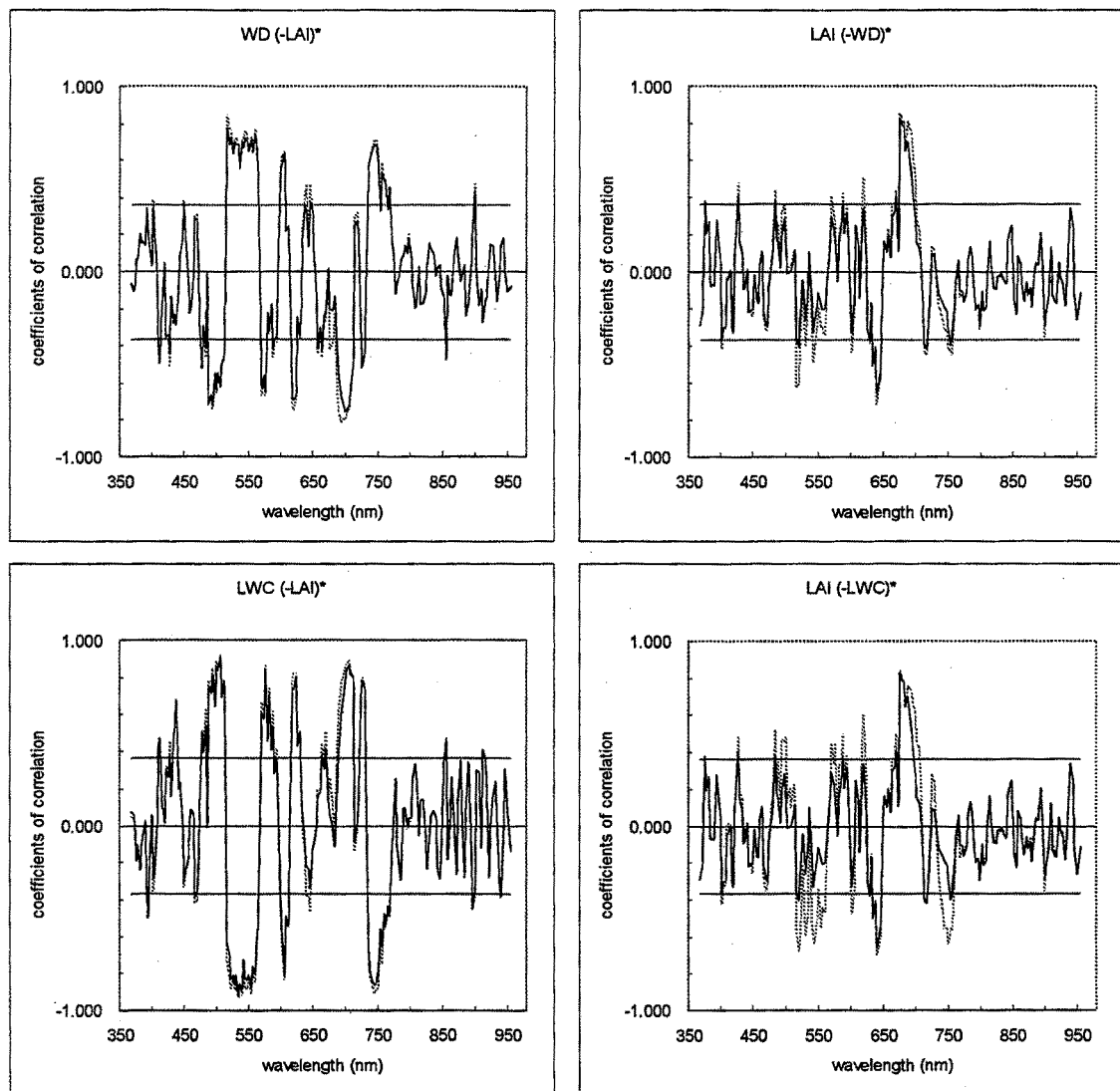


図 3.7 WD、LWC、および LAI と 2 階微分スペクトルとの相関係数および偏相関係数($n=30$). 相関係数(r)は黒で、偏相関係数(r_p)はグレーで示されている。偏相関係数の統計的有意水準を水平な 2 本の線で示した($p<0.05$)。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、偏相関係数ではその影響が取り除かれたことを表す。

表 3.2 WD、LWC および LAI を独立に計測するための単変量指数として選ばれたバンドの相関係数 (n=30)

first derivative			
<i>best single band (nm)</i>	WD	LWC	LAI
519.6 (LWC)	-0.668	<i>0.916</i>	0.014
611.4 (WD)	<i>0.807</i>	-0.750	-0.191
690.7 (LAI)	-0.014	-0.141	<i>0.805</i>
<i>contiguous bands (nm)</i>	WD	LWC	LAI
1 381.4 - 391.7	0.684	-0.845	0.021
2 502.8 - 527.9	-0.693	<i>0.906</i>	0.026
516.8 - 522.4	-0.669	<i>0.916</i>	0.012
3 599.7 - 617.3	<i>0.807</i>	-0.723	-0.207
4 687.8 - 693.7	-0.070	-0.080	<i>0.812</i>
second derivative			
<i>best single band (nm)</i>	WD	LWC	LAI
533.5 (LWC)	0.685	-0.913	-0.100
676.0 (LAI)	-0.202	0.060	<i>0.828</i>
699.6 (WD)	-0.752	<i>0.792</i>	0.291
<i>contiguous bands (nm)</i>	WD	LWC	LAI
1 488.9 - 505.6	-0.704	<i>0.891</i>	0.124
500.0 - 505.6	-0.626	<i>0.909</i>	0.047
2 516.8 - 559.0	0.737	-0.873	-0.209
530.7 - 539.1	0.693	-0.913	-0.113
3 570.5 - 579.1	-0.671	<i>0.819</i>	0.196
4 599.7 - 608.5	0.691	-0.806	-0.150
5 617.3 - 623.2	-0.725	<i>0.800</i>	0.258
6 676.0 - 684.9	-0.192	-0.048	<i>0.803</i>
7 699.6 - 708.5	-0.735	<i>0.855</i>	0.170
8 723.4 - 729.3	-0.468	<i>0.796</i>	0.048
9 738.2 - 750.1	0.672	-0.860	-0.198

¹⁾ For contiguous bands, we used arithmetic average of the bands.

²⁾ Values in **bold** show statistical significance ($p < 0.05$).

³⁾ Values in *italic* show strong correlation ($|r| > 0.800$).

り照射光の違いは理論的に取り除かれ、また、樹冠反射スペクトルにたいする低次関数の影響は微分により最小化されるからである (Curran et al., 1990; Demetriades-Shah, 1990)。また、このことを PROSPECT (Jacquemoud et al., 2000) と KUUSK (Kuusk, 1995) モデルを利用したシミュレーションによって確かめることができた (図 3.8)。実験中に観測されたスペクトルの変化と比較すれば、ことなる直達光の比率でシミュレートされた微分スペクトルはほとんど一致していると言えた。

3.1.4.2 樹冠スペクトルの変化

先行研究では、反射スペクトルは主に、可視域では葉内色素、近赤外域では葉肉構造によってコントロールされていることが示されている (Ferns et al., 1984; Ceccato et al., 2002)。水の直接の影響は可視域や近赤外域においては卓越しておらず (Horler et

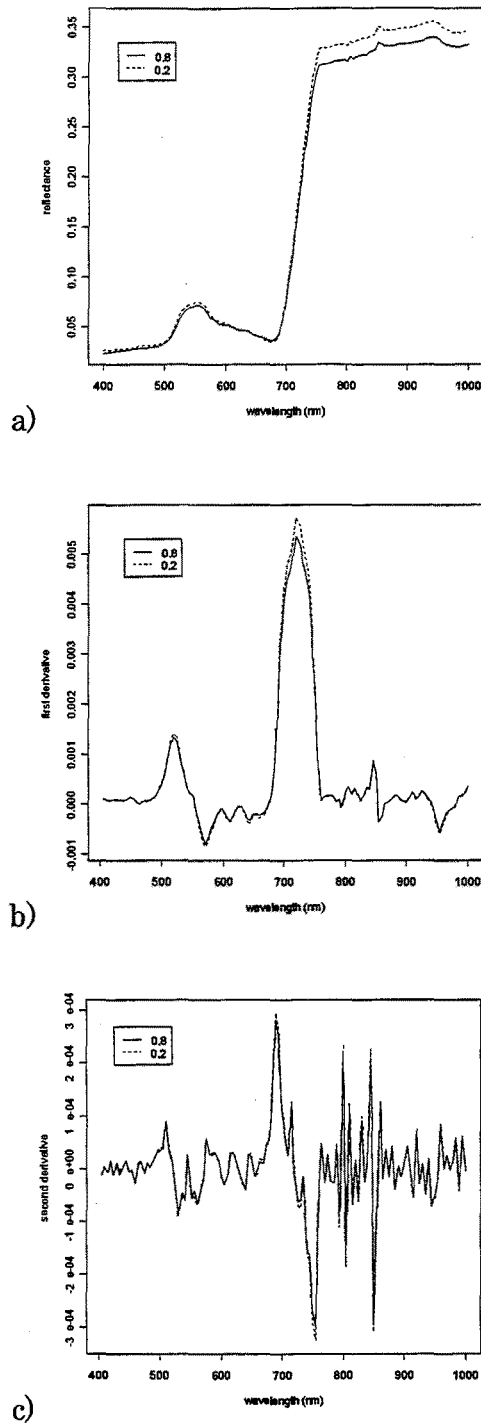


図 3.8 ことなる直達光の比率でシミュレートされた樹冠反射光：a) 反射、b) 1 階微分、c) 2 階微分スペクトル。直達光の比率として、晴天に 0.8 を、薄曇りに 0.2 を選んだ。PROSPECT モデルの入力パラメーターは $N=1.5$ 、 $C_w=0.015$ 、 $C_m=0.010$ 、 $C_{ab}=35.0$ とし、KUUSK モデルの入力パラメーターは $th0=40.0$ 、 $phi=0.0$ 、 $L=2.0$ 、 $sf=0.02$ 、 $eps=0.0$ 、 $thm=0.0$ 、 $th^*=10.0$ とした。土壌反射スペクトルには Johns Hopkins University Soil Library の brown sandy roam を使用した。結果は、ナディア方向から観測した場合の値である。

al., 1983)、中間赤外において顕著である (Danson et al., 1992)。渇水ストレスは、構造の変化を通し、結果的に散乱過程を変化させ、近赤外域の反射スペクトルに影響を与えている可能性がある (Filella and Peñuelas, 1994)。樹冠レベルでは、他の要因、例えば樹冠の構造、バックグラウンドの土壌や照射光の条件が、反射率の変化に寄与している。WD と LWC と、いくつかのバンドとの強い相関は、渇水ストレスの間接的、複合的産物であると考えられる。

渇水ストレスが強くなったとき、反射スペクトルはほとんど直線的に単調増加することが観察された。この現象は、1 階微分スペクトルにおいては、正の小さな値であり、比較的平坦なスペクトルとして観察された。570、615、660 nm 付近の 3 つの谷の値は、負から正へと変わり、強いストレス条件下では谷は消滅した。また、植物が強い渇水ストレスを受けたとき、1 階微分スペクトルでは 410 nm 付近のピークが現れた。

これらの 1 階微分スペクトルの変化は、部分的には、葉のクロロフィル濃度が減少し、それにともないクロロフィルがフェオフィチンへと変化することに起因しているのではないかと思われた。まず、クロロフィル濃度が減少し、赤域におけるクロロフィルの吸収 (クロロフィル a および b の吸収のピークはそれぞれ 660 および 642 nm (Lichtenthaler, 1987)) が減少したことが、3 つの谷が消えたひとつの原因であると思われる。また、大気汚染や酸性雨によるストレスを受けた葉や、秋に紅葉した葉において、クロロフィルはフェオフィチンへと変化することが知られている (Garty et al., 1997; Shan, 1998; Tang et al., 2000)。Mg の欠けたクロロフィル a である、フェオフィチン a は、409 から 418 nm 付近をピークに、短波長側に比較的強い吸収帯をもつことから (Lichtenthaler, 1987)、このクロロフィルの変化が 1 階微分スペクトルの 410 nm 付近のピークの成因である可能性がある。

3.1.4.3 微分スペクトルの有効性

渇水ストレスおよび LAI の独立した計測を可能にする最適な単変量指数を求めるという観点からは、反射スペクトルはどの波長も有用ではなかった (図 3.5)。一方、1 階微分および 2 階微分スペクトルは独立した計測が可能なバンドを含んでいた (図 3.6 および 3.7)。このことから、微分スペクトルは、反射スペクトルとはことなる情報を含有しており、樹冠レベルにおいて植生の情報を抽出するのに有効であると考えられた。

また、微分スペクトルでは、土壌のスペクトルは 0 付近の値に収まっており、植生のスペクトルと比較してもその値は小さかった (図 3.4)。このことから、微分スペクトル

によりバックグラウンド効果が抑制されていると考えられた。

3.1.4.4 レッドエッジポジションの有効性

REP は植生ストレスあるいは LAI のよく知られた指標であるが、強い相関を示す偏相関係数は見られなかった ($|r_p| < 0.800$)。したがって、樹冠レベルにおいて WD、LWC あるいは LAI の独立した計測に REP が有用であるという証拠を得ることはできなかった。

3.1.4.5 最適な単変量指数

渇水ストレスと LAI を独立に計測するために望ましいバンドを表 3.2 にあげた。WD、LWC、および LAI の計測に最良の単バンドは、それぞれ、1 階微分スペクトルの 611.4 nm ($r=0.807$)、1 階微分スペクトルの 519.6 nm ($r=0.916$)、2 階微分スペクトルの 676.0 nm ($r=0.828$) であった。同様に、最良の連続バンドは、それぞれ、1 階微分スペクトルの 599.7~617.3 nm ($r=0.807$)、1 階微分スペクトルの 516.8~522.4 nm ($r=0.916$)、1 階微分スペクトルの 687.8~693.7 nm ($r=0.812$) であった。1 階微分スペクトルにおいて、WD は 3 つの谷の 2 つ目と、LWC は緑域のピークと、LAI はレッドエッジのピークの始まる短波長側の波長と強い関係があるようであった。レッドエッジピークと LAI の関係はすでに注目されているが、レッドエッジピークの頂上よりも、ピークの始まり (短波長側) の波長が LAI の独立した計測に適していることが明らかとなった。

3.1.5 まとめ

アラカシおよびコナラの反射、1 階微分、2 階微分スペクトルにおいて、それぞれ 3 つ、6 つ、8 つの特徴を確認した。渇水ストレス条件下で反射スペクトルは徐々に単調増加となったことから、微分スペクトルでは、強い渇水ストレスのもとで 1 階微分スペクトルの 410 nm 付近のピークが現れたことを除き、これらの特徴は消える傾向にあった。

微分スペクトルは、相関スペクトルに見ることができたように、反射スペクトルとはことなる情報を有しており、樹冠レベルにおいて植生の情報を抽出するのに有効であると考えられた。また、微分スペクトルによる土壌のバックグラウンド抑制効果が確認された。しかし、レッドエッジポジション (REP) は WD、LWC および LAI との偏相関係数が低く、渇水ストレスや LAI の独立した計測のためのよい指標であるとは言えない。

かった。

レッドエッジはピークだけでなく、他の部分にも注意が払われるべきであることが明らかとなった。とくに、2階微分スペクトルの676.0 nm および1階微分スペクトルの687.8~693.7 nm、つまりレッドエッジの始まり（短波長側）の部分が、単変量指数としてはLAIともっとも強い相関をもつようであった。

さまざまなLAI条件下で、灌水停止時間（WD）および葉内水分量（LWC）を独立に計測するための最適な単変量指数は、それぞれ、1階微分スペクトルにおける3つの谷の2つ目のバンドと、緑域のピークのバンドであった。

3.2 ハイパースペクトルによる最適な植生指数の探索

3.2.1 背景と目的

第1章で論じたように、既存の植生指数の多くは、クロロフィル吸収帯と近赤外域の反射特性に依拠しており、渇水ストレスのほかに、樹冠の葉の粗密度の影響も受けている。緑地の診断や管理において、植生のストレス状態と葉量を評価することは一般に望ましいことである。しかしながら、これらの植生指数に、両者の影響が各々どれくらいの重みで反映されるのかがわからない所に問題があると考えられる。この問題にたいするもっとも明快な解答は、第3の変数の同時的影響のない（あるいはできるだけ少ない）指数により目的の変数を評価することである。このような背景のもと、渇水ストレスおよびLAIの同時的影響のもっとも少ない植生渇水ストレス指数を探し出すことを目的とした実験を行った。

なお、前年の実験において、微分スペクトルが、反射スペクトルとはことなる性質の情報を有し、土壌のバックグラウンド効果を抑制する特長をもつことが示されたことから、植生渇水ストレス指数に微分スペクトルも利用することとした。また、渇水ストレスにともなうスペクトルの変化の要因として、前年の結果より示唆されたクロロフィル濃度の減少、フェオフィチンへの変化、樹冠構造の変化の裏づけを得るべく、クロロフィル濃度、クロロフィルa/フェオフィチンa比の定量、葉の傾斜角、葉の見かけの大きさの比率、比葉面積（SLA）の計測を新たに行うこととした。

3.2.2 方法

2003年3月、アラカシおよびコナラの2年生苗のそれぞれ約200本を、適量の肥料を均一に混ぜあわせた用土を使って、直径約20 cmの鉢に2本ずつ植えた。その後、1

日に1度十分な灌水を行い、6月と7月に一度ずつ追肥を施した。そして、2003年9月26日、29日からはコナラの各20鉢の灌水を停止し、10月24日、28日からアラカシの各20鉢の灌水を停止した。渇水ストレスを与えた鉢に加え、コントロールとして灌水を続けた鉢も用意した。コナラ、アラカシとも、灌水を停止した植物のすべての葉が乾燥し、褐色から黄色味を帯びるまでを測定期間とした。測定時期のコナラおよびアラカシの樹高は約0.7 mであった。

3段階のLAIを設定するため、上面80×80 cmの3つの木箱の中に、それぞれ1、4あるいは9鉢の苗を均等に隙間をあけて設置した。鉢の隙間には土を入れ、表層は自然乾燥した赤玉土（細粒）を3 cm厚で敷き詰めた。

測定は、晴れの日を選び、コナラは9月26日、10月1日、10日の3回、アラカシは10月24日、31日、11月12日の3回に行った。各日とも3段階の渇水ストレス（前日に灌水を行った灌水停止16時間後のコントロールを含む）と3段階のLAIを組み合わせた条件下で、アラカシおよびコナラの反射スペクトルを測定した。ただし、9月26日および10月24日は灌水停止予定の苗も灌水を行っている状態でそれぞれ計測を行った。分光放射計SE590 (Spectron Engineering, Inc., Denver, U.S.A.)は、15°の視野角をもつアタッチメントをつけ、ナディア方向に向けて、地上3 mのところに設置し、木箱の上面で直径約60 cmの円の範囲を計測できるようにした。各チャンネルは約3 nm間隔、約10 nmの半値幅をもつ。368.4から1113.7 nmのスペクトルを1度に8回計測し平均値を記録した。ターゲットの測定と交互に、ターゲットの直上に置いた60×80 cmのBaSO₄標準白色板を測定する方法で、ひとつのターゲットにつき4~7セット繰り返して測定を行った。その後、ターゲットのDN値をBaSO₄標準白色板のDN値で除し、相対反射スペクトル（以下、反射スペクトル）を求めた。反射スペクトルには3次スプライン関数をあてはめた。すべての測定は、35° 02' N、135° 47' Eにある京都大学フィールド科学教育研究センター北白川試験地において、10:00 から14:00の間に行った。

アラカシとコナラの渇水ストレス状態については、各渇水ストレス状態の植物から3サンプルの枝を採取し、夜明け前の木部圧ポテンシャルをプレッシャーチャンバー法により測定した。また、LWCおよびSLAの計測のために、各ストレス状態の植物から6~18サンプルの葉を採取し、直ちに面積と生重を測ったのち、105℃に設定した乾燥炉で48時間乾燥し、乾重を測定した。このときLWCに関しては、あらかじめ樹冠内の葉を10枚おきに、乾燥の程度により1~3段階にクラス分けし、葉面積を計測してお

いた。そして、各クラスについて6枚のサンプルを採取して、上記の方法で各クラスの平均 LWC を求め、最後に、各クラスの葉面積に比例した重みづけ平均によって樹冠平均 LWC を求めた。土壌マトリックポテンシャルは、TDR 土壌水分計 HydroSense (Campbell Scientific, Inc., Logan, U.S.A.) により体積含水率 (3 回計測の平均値) を測定し、加圧板法により求めておいた土壌水分特性曲線からを算出した。渇水ストレス状態を表す変数としては、2002 年と同様に、灌水停止時間 (WD) と葉内水分量 (LWC) を考えた。

クロロフィル a および b の濃度は、N,N'-ジメチルホルムアミド (DMF) によって抽出した後、分光光度計 U-1000 (Hitachi, Tokyo, Japan) により吸光度を測定し、Porra et al. (1989) の式により定量した。この分光光度計による定量は各ストレス状態の植物について 6 サンプルずつ行い、これと同時に葉緑素計 SPAD-502 (Minolta, Tokyo, Japan) によって SPAD 値 (各サンプルとも 6 回計測の平均値) を計測し、SPAD・クロロフィル濃度 (a+b) の指数近似曲線を求めた。そして、樹冠の平均クロロフィル濃度を求めるために、スペクトルを計測した樹冠のすべての葉を 10 枚おきにサンプリングして SPAD 値 (2 回計測の平均値) を計測し、先ほどの指数近似曲線から樹冠の平均クロロフィル濃度 (a+b) を算出した。また、フェオフィチン a/クロロフィル a 比を、Garty et al. (1997) の方法に倣い、435 nm の吸光度を 415 nm の吸光度で除して求めた。

葉の傾斜角、葉の見かけの大きさの比率および葉の面積は、スペクトルを測定した樹冠のすべての葉を 10 枚おきにサンプリングして次のように計測した (コナラ n=115~141、アラカシ n=168~212)。葉の傾斜角は、水平を 0 度とし、その水平線よりも葉の先端が上になった状態では正、下になった状態を負の値として、1 度刻みで記録した。葉の見かけの大きさの比率 (AR) は、渇水ストレスにより葉がカールしている状態を数値化するために設定した変数で、葉の垂線ベクトル方向から見て、葉が十分に展葉している状態を 1.0 とした場合の、見かけの面積の比率とした。AR は 0.1 刻みで記録した。葉の面積は、事前に各樹種 30 サンプルの葉の最大葉幅と最大葉長 (葉柄を除く) を計測し、葉幅×葉長×係数により面積が求まるような係数を求めておき、この係数と計測した葉幅と葉長から算出した。LAI は、葉の平均面積に葉の枚数をかけて葉面積を求め、それを地表面積で除すことにより求めた。

まず、反射、1 階微分、2 階微分スペクトルの波長にたいし、変数 (WD、LWC あるいは LAI) との相関係数(r)および偏相関係数(r_p)を計算した。さらに、系統的に最適な多変量指数を求めるために、次の 5 つのタイプの多変量指数を想定した。

- 1) 加算型 $b_1 + b_2$
- 2) 減算型 $b_1 - b_2$
- 3) 乗算型 $b_1 \times b_2$
- 4) 除算型 b_1 / b_2
- 5) 正規化差分型 $(b_1 - b_2) / (b_1 + b_2)$

b_1 : バンド 1 における反射率、あるいはその 1 階微分値、2 階微分値

b_2 : バンド 2 における反射率、あるいはその 1 階微分値、2 階微分値

ただし、同一の多変量指数において反射率、1 階微分値、2 階微分値を混ぜることは行わなかった。

以上の 5 タイプについて、各バンドの組み合わせを総当たりで、相関係数および偏相関係数を計算した。これらの結果から、第 3 の変数の同時的影響が小さく ($|r_p \cdot r| < 0.050$)、目的の変数との相関および偏相関ができるだけ強い多変量指数を探索した。ただし、コナラとアラカシの実験時期がことなることから、WD に関係する分析は、コナラとアラカシのデータを分離して別々に行った。以上の統計処理は R 1.8.1 (R Development Core Team, 2003) を用いて行った。

また、既存の植生指数を計算するために、SE590 のハイパースペクトルデータをセンサー応答関数により Landsat 5/TM のバンド 1 (青域)、3 (赤域)、4 (近赤外域) の応答値をシミュレートして利用した。なお、SAVI などいくつかの植生指数ではソイルラインの傾きと切片が必要になる。ソイルラインは、乾燥した赤玉土と、水をかけて湿らせた赤玉土の反射スペクトルを TM のバンド 3、4 の応答値に変換することにより求めた。その他、SE590 のバンドとことなる特定の波長の反射率、1 階微分値、2 階微分値が必要な場合は、線形補間によりその値を求めた。

さらに、より低い波長分解能のデータの有効性を調べるために、SE590 の約 3 nm (2.5 - 3.2 nm) 間隔のデータを、Hyperion や AVIRIS の仕様とほぼ同じ 10 nm 間隔に変換した。この際、10 nm 間隔のセンサーの各チャンネルの応答値は 10 nm の半値幅をもつ正規分布をしていると仮定した。

最後に、PROSPECT (Jacquemoud et al., 2000) および KUUSK (Kuusk, 1995) モデルにアラカシの実測パラメーターを入力して、渇水ストレスにともなうスペクトル変化のシミュレーションを行った。PROSPECT は、クロロフィル濃度 ($a+b$)、葉内水分量、葉内構造指数および葉乾物量をパラメーターとする葉の反射および透過スペクトルの、現在もっともよく使われているシミュレーションモデルである。KUUSK は、樹冠反射

スペクトルのシミュレーションモデルで、もっともよく知られている SAIL (Verhoef, 1984) モデルを部分的に利用しているが、樹冠のホットスポットおよび葉面における鏡面反射を考慮する点などで改良が施されている。なお、KUUSK のバックグラウンド土壌の反射スペクトルには自然乾燥した赤玉土の実測反射スペクトルを利用した。葉傾斜角分布を指定するパラメーターである最頻葉傾斜角 (modal leaf inclination) は実測データの最頻値により、離心率 (eccentricity) は最小二乗法により実測データを楕円分布モデルにあてはめて決定した。これらの入出力データは 5 nm 間隔であり、実測データと同様に 3 次スプライン関数によりスムージングを行い分析した。

3.2.3 結果

3.2.3.1 渇水ストレス状態

LWC は、コナラで灌水停止 136 時間後まで、アラカシで 112 時間後まで 50 %程度に維持され、その後、時間とともに減少した (図 3.9)。夜明け前の木部圧ポテンシャルは灌水停止後すぐに低下し、コナラで灌水停止 64 時間、アラカシで灌水停止 112 時間を越えた後は 4.0 MPa 以下の計測不能となった (図 3.10)。したがって、渇水ストレス状態を表現する変数のひとつとして、夜明け前の木部圧ポテンシャルを採用することはできなかった。土壌マトリックポテンシャルは H_2O cm の常用対数である pF により表した。土壌マトリックポテンシャルは灌水停止後すぐに低下し始め、コナラは約 150 時間後、アラカシは約 200 時間後に初期萎れ点に達し、コナラ、アラカシとも約 300 時間後に永久萎れ点を越えた (図 3.11)。

3.2.3.2 渇水ストレスにともなう各種パラメーターの変化

クロロフィル濃度 (a+b) は、コナラは灌水停止 280 時間後、アラカシは 376 時間後まで微減し続け、その後は減少の程度が大きくなった (図 3.12)。クロロフィル a/フェオフィチン a 比は、コナラは 280 時間後、アラカシは 376 時間後までほぼ一定か微減傾向にあったが、その後は減少の程度が大きくなった (図 3.13)。葉の傾斜角の分布は、コナラは 136 時間後、アラカシは 112 時間後までは中央値がほぼ 0 度付近を保っていた (図 3.14)。しかし、それ以降は、葉の傾斜角の分布の中央値が、コナラでは 23~26 度、アラカシでは 18~25 度へと変化したことを示した。AR は、コナラは 64 時間後、アラカシは 184 時間後まではほとんど変化しなかったが、その後、コナラは平均 0.70、アラカシは平均 0.90 まで減少した (図 3.15)。SLA および LAI は

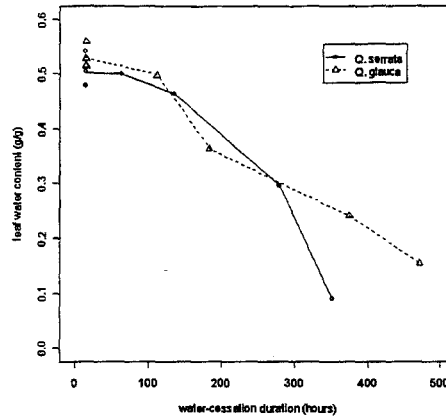


図 3.9 樹冠平均葉内水分量 (LWC) の時間変化. 各点は樹冠平均 LWC を表す。各線は各時点における平均値を結んだ線。

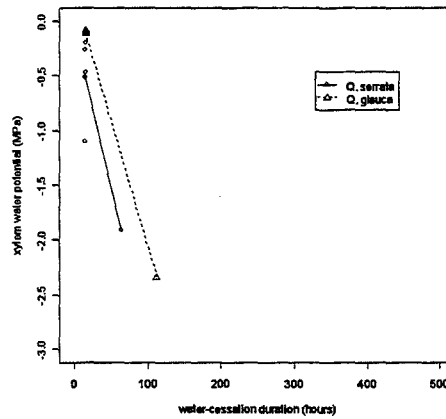


図 3.10 夜明け前の木部圧ポテンシャルの時間変化. 各点は 3 サンプルの平均値を表す。各線は各時点における平均値を結んだ線。

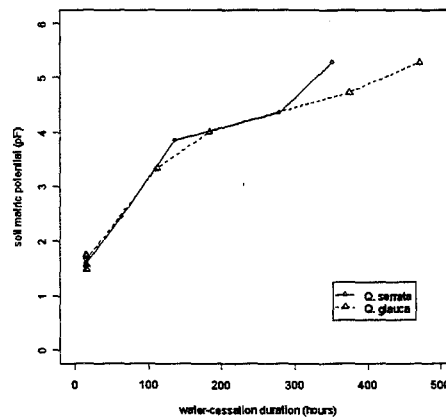


図 3.11 土壌マトリックスポテンシャルの時間変化. 各点は体積含水率 3 サンプルの平均値から求めた土壌マトリックスポテンシャルを表す。各線は各時点における平均値を結んだ線。

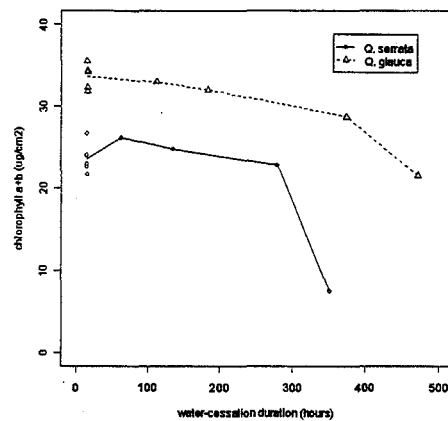


図 3.12 樹冠平均クロロフィル濃度 (a+b) ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) の時間変化. 各点は樹冠平均クロロフィル濃度を表す. 各線は各時点における平均値を結んだ線。

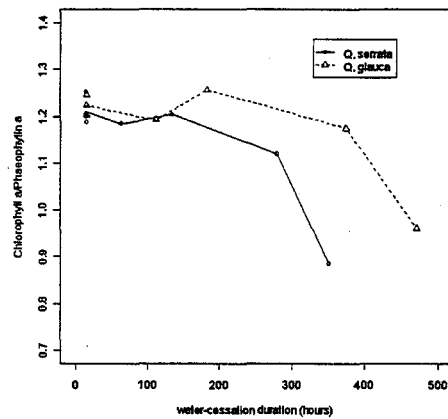


図 3.13 クロロフィル a/フェオフィチン a 比の時間変化. 各点は 6 サンプルの平均値を表す. 各線は各時点における平均値を結んだ線。

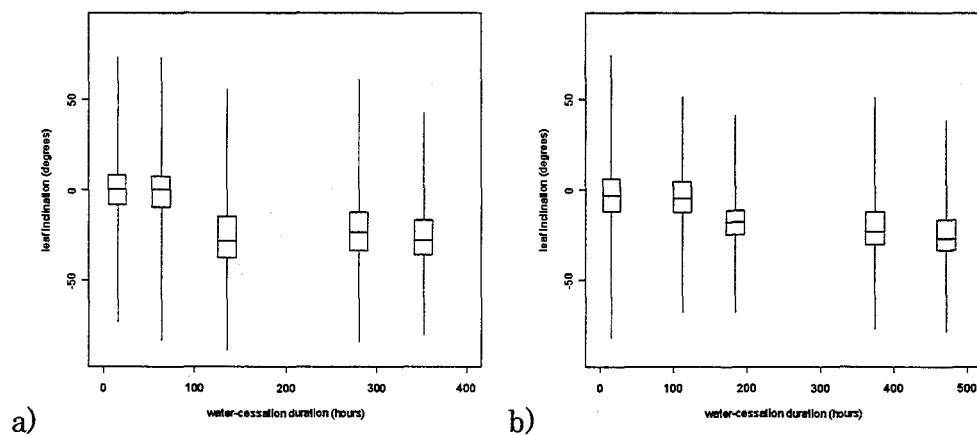


図 3.14 葉の傾斜角分布の時間変化 : a) コナラ、b) アラカシ. 箱の上端、中央の横線、下端はそれぞれ 25、50 (中央値)、75 パーセンタイルを、上下のひげは傾斜角のレンジを表す。

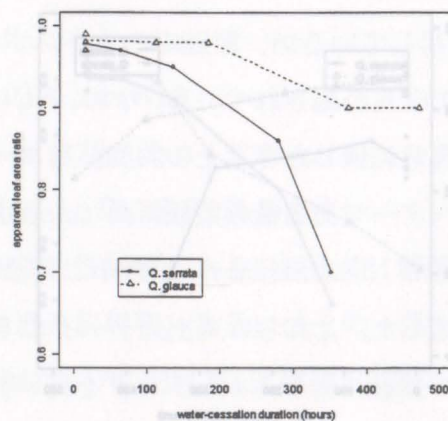


図 3.15 葉の見かけの大きさの比率の時間変化。各点は樹冠のすべての葉を 10 枚おきにサンプリングして計測した値の平均値を表す（コナラ $n=115\sim141$ 、アラカシ $n=168\sim212$ ）。各線は各時点における平均値を結んだ線。

測定期間中ほぼ一定の傾向を示し、SLA の平均値はコナラ $138.1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、アラカシ $89.5 \text{ cm}^2/\text{g}$ で、6 サンプルの平均値のレンジはコナラ $121.2\sim144.4 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、アラカシ $77.4\sim126.9 \text{ cm}^2/\text{g}$ であった。3 段階の LAI の平均値はそれぞれ、コナラでは 0.3、1.3、2.9、アラカシ 0.7、2.0、5.0 で、レンジはそれぞれコナラ $0.2\sim0.3$ 、 $1.1\sim1.5$ 、 $2.4\sim3.1$ 、アラカシ $0.6\sim0.8$ 、 $1.7\sim2.4$ 、 $4.4\sim5.5$ であった。参考のため、灌水停止後のコナラおよびアラカシの葉の変化（写真）を図 3.16 に示した。

3.2.3.3 スペクトル上の変化

反射、1 階微分および 2 階微分スペクトルにおける、渇水ストレスおよび LAI にもなう変化は、コナラ、アラカシとも前年と同様の特徴を有していた（図 3.17、詳細は前節 3.1.3.2 を参照のこと）。

3.2.3.4 相関および偏相関スペクトル

反射スペクトルでは、前年とことなり、WD や LWC よりも LAI と相関および偏相関が強い傾向があった（図 3.5、図 3.18）。また、コナラとアラカシの WD の相関および偏相関スペクトルは形状は似ているものの値がかなりことなり、LAI の相関および偏相関係数の差は可視から約 900 nm の波長域においてコナラとアラカシで大きくことなっていた。

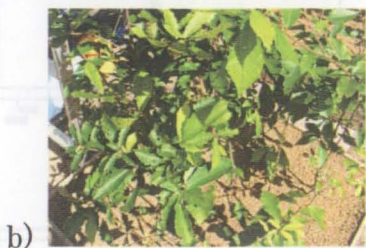
1 階微分スペクトルの相関および偏相関は全体的に前年よりも弱かった。WD にたい



a)



f)



b)



g)



c)



h)



d)



i)



e)



j)

図 3.16 コナラおよびアラカシの葉の経時的変化。 渇水停止 a)16、b)64、c)136、d)280、e)352 時間後のコナラおよび、f)16、g)112、h)184、i)376、j)472 時間後のアラカシ。 渇水停止実験期間は、コナラが 9 月 26 日～10 月 10 日、アラカシが 10 月 24 日～11 月 12 日であった。

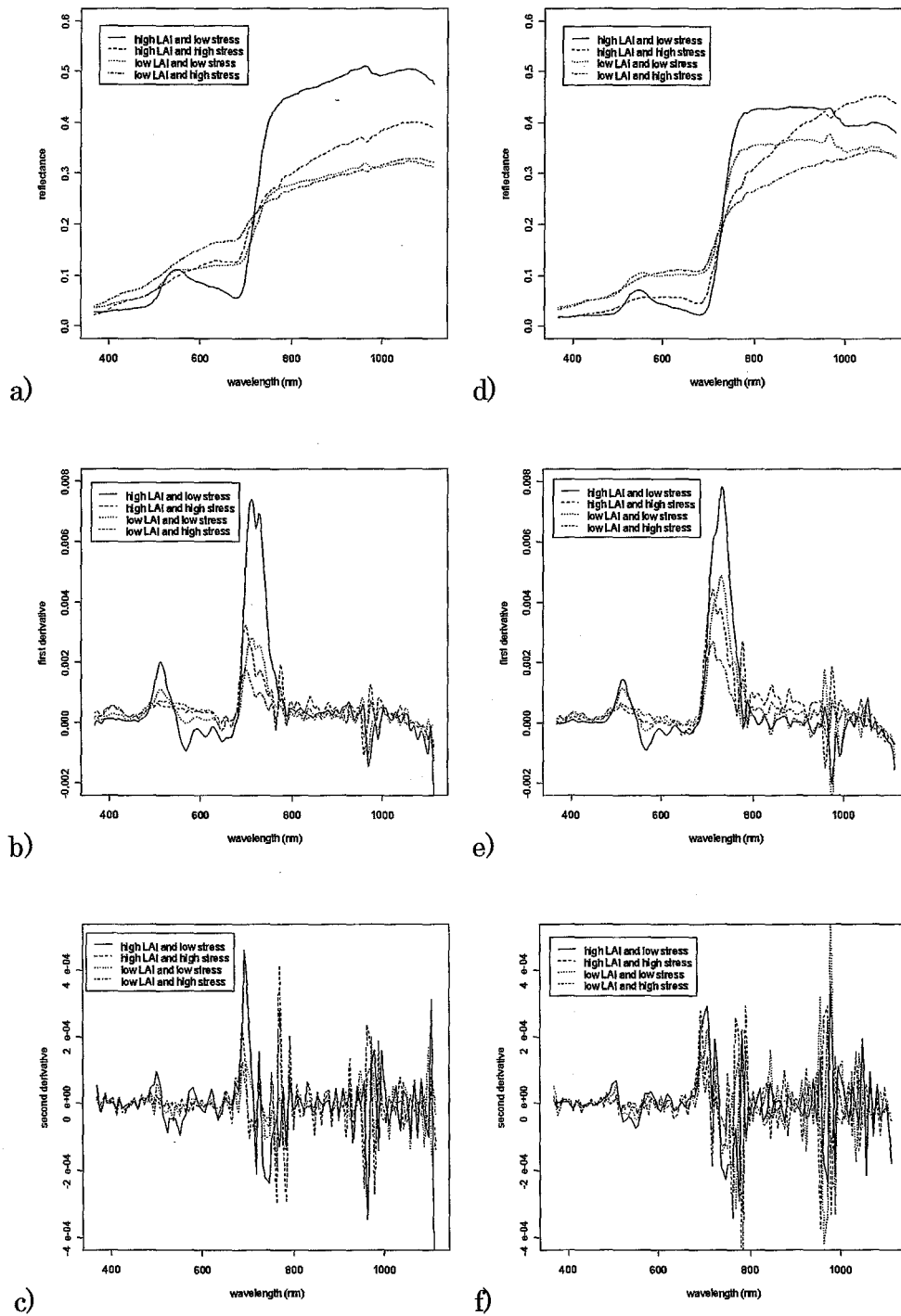


図 3.17. コナラ (2003 年 10 月 10 日) の a) 反射、b) 1 階微分、c) 2 階微分スペクトルとアラカシ (11 月 12 日) の d) 反射、e) 1 階微分、f) 2 階微分スペクトル。本図において LAI の高低はそれぞれコナラでは約 2.9 と約 0.3、アラカシでは約 5.0 と約 0.7 のことを、水ストレスの強弱はそれぞれコナラでは灌水停止 352 時間後、アラカシでは灌水停止 472 時間後と、灌水あり (灌水停止 16 時間後) のことを指す。

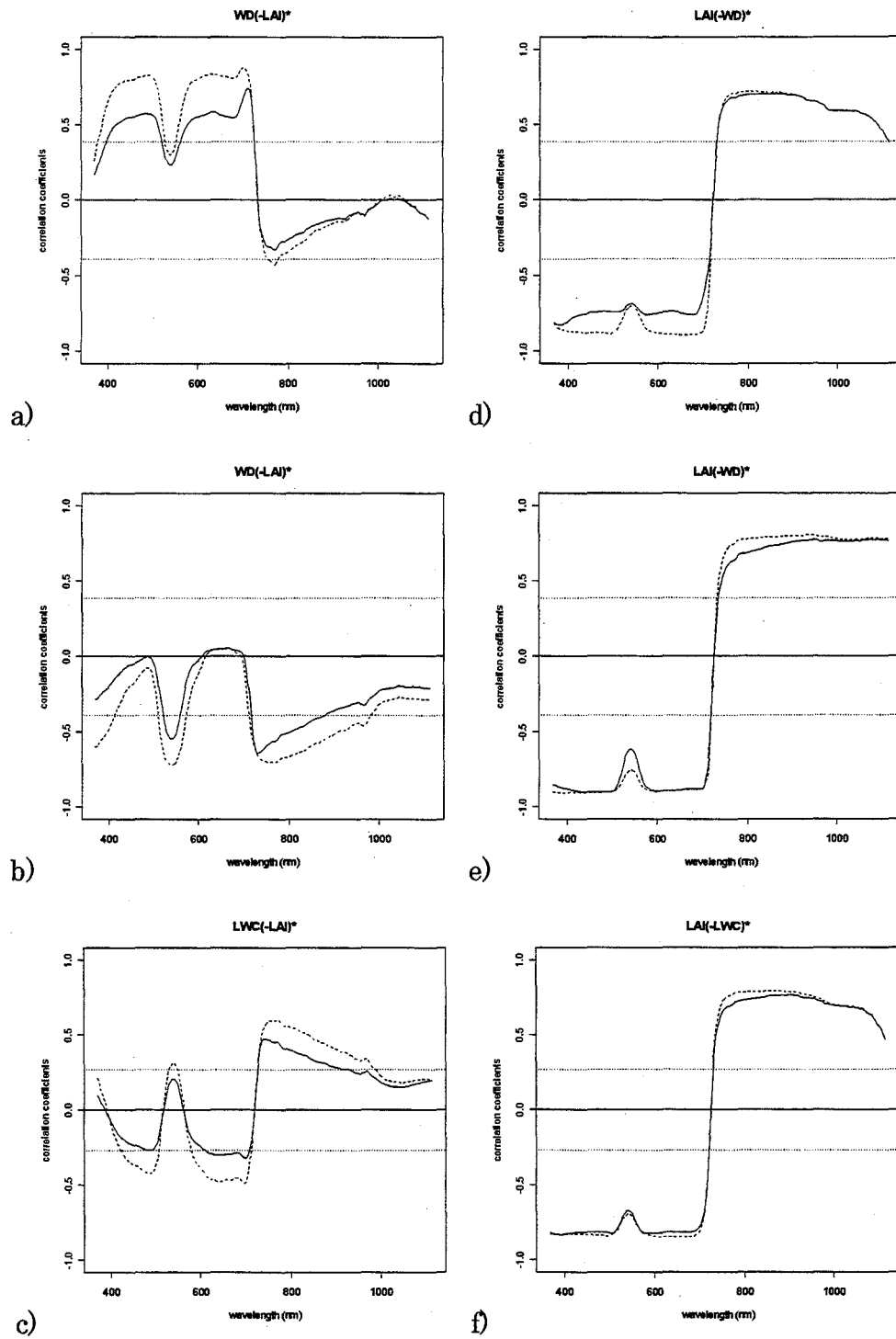


図 3.18 WD、LWC および LAI と反射スペクトルとの相関係数および偏相関係数。相関係数 (r) は実線で、偏相関係数 (r_p) は破線で示されている。偏相関係数の統計的有意水準を水平な 2 本の点線で示した ($p < 0.05$)。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、偏相関係数ではその影響が取り除かれたことを表す。

a), d) にはコナラ ($n=27$)、b), e) にはアラカシ ($n=27$)、c), f) には両種のデータ ($n=54$) を利用した。

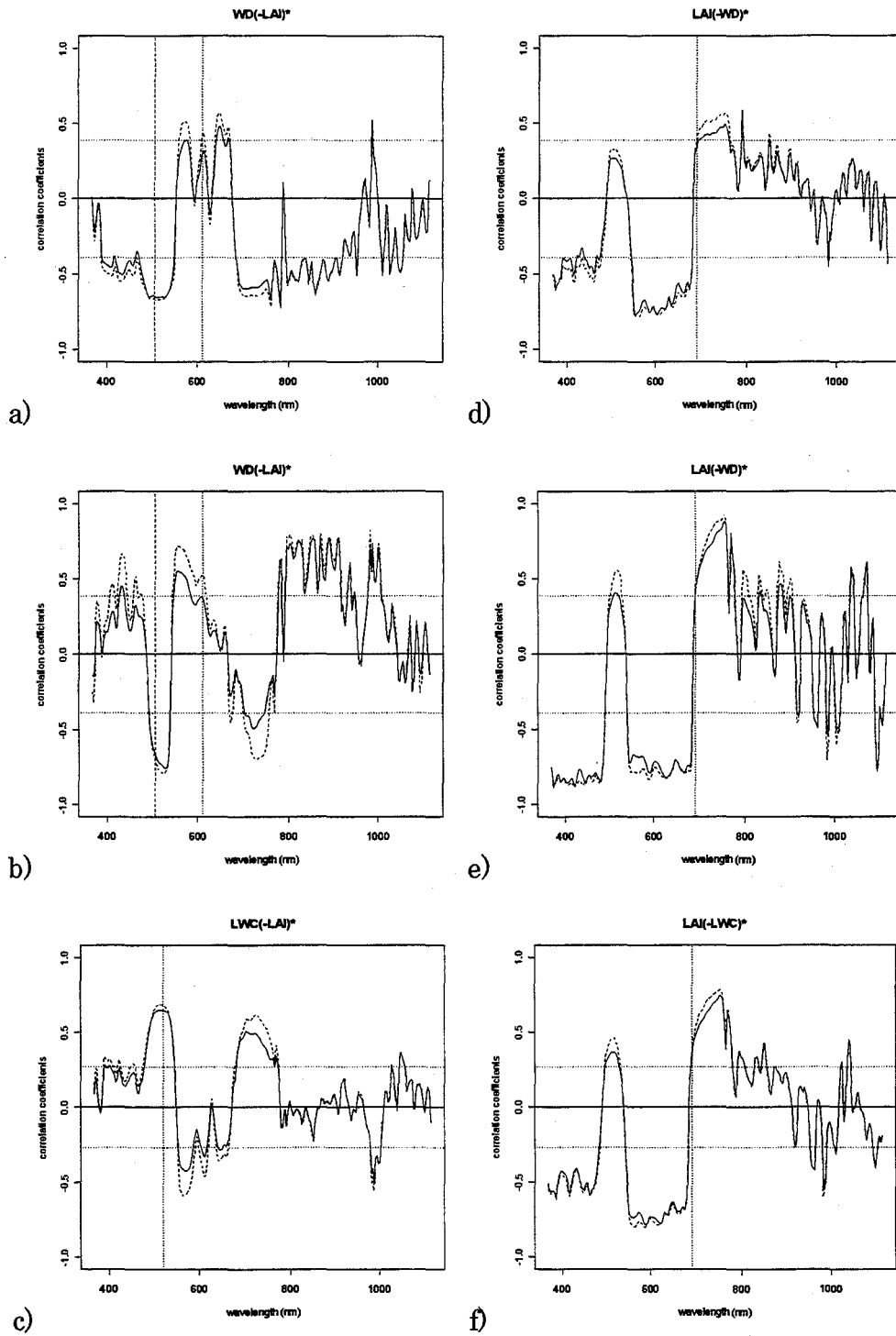


図 3.19 WD、LWC および LAI と 1 階微分スペクトルとの相関係数および偏相関係数。相関係数(r)は実線、偏相関係数(r_p)は破線。 r_p の有意水準を水平な 2 本の点線で示した($p < 0.05$)。垂直の点線は 2002 年データで最も結果のよかった単バンドの波長を、WD の垂直の破線は、2002、2003 年を通して最も結果のよかった単バンド(505.6 nm)を示す。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、 r_p ではその影響が取り除かれたことを表す。

a), d)にはコナラ($n=27$)、b), e)にはアラカシ($n=27$)、c), f)には両種のデータ($n=54$)を利用した。

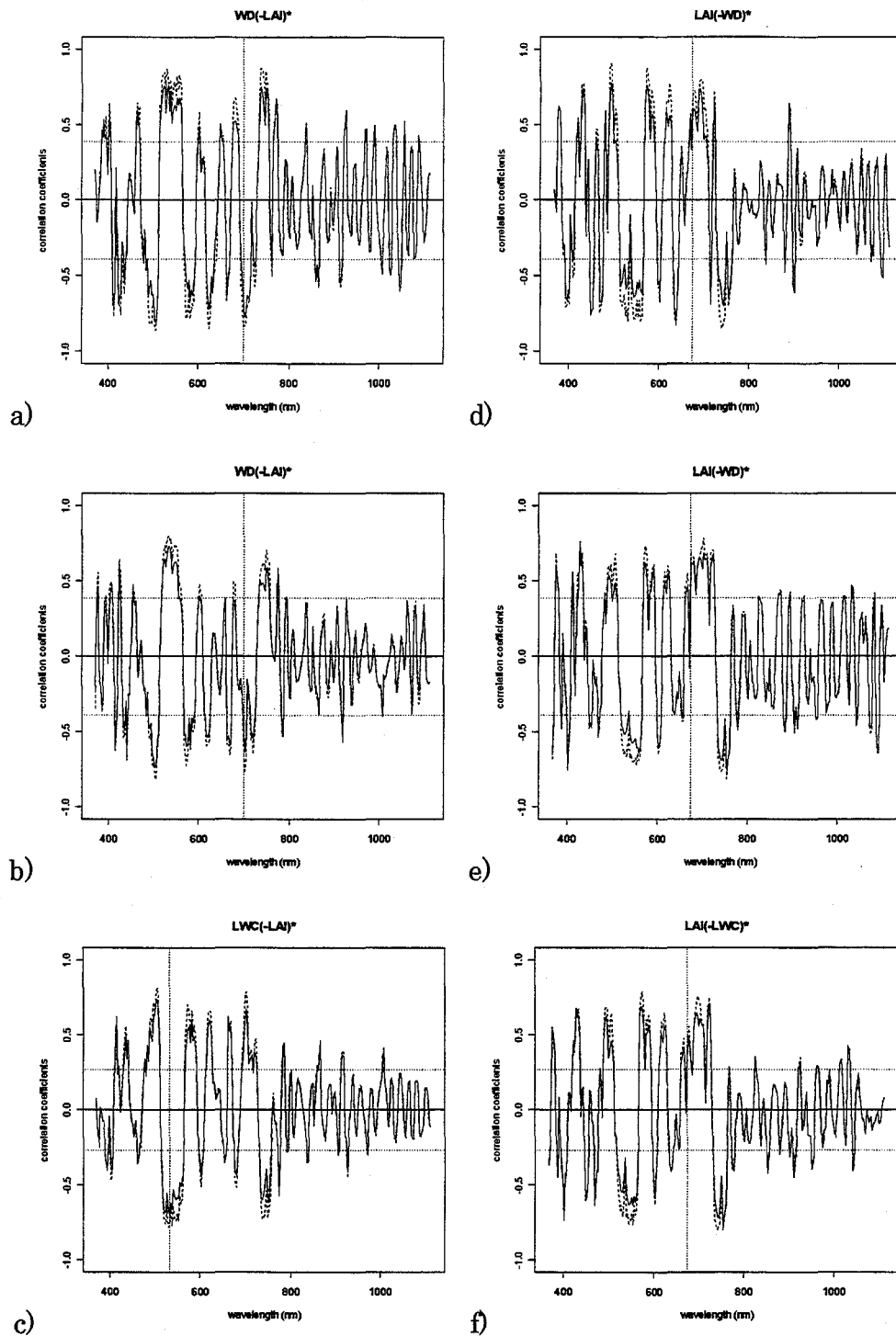


図 3.20 WD、LWC および LAI と 2 階微分スペクトルとの相関係数および偏相関係数。相関係数(r)は実線で、偏相関係数(r_p)は破線で示されている。偏相関係数の統計的有意水準を水平な 2 本の点線で示した($p < 0.05$)。垂直の点線は 2002 年データでもっとも結果のよかった単バンドの波長を示す。

* カッコ内の変数は第 3 の変数を表し、偏相関係数ではその影響が取り除かれたことを表す。

a), d)にはコナラ($n=27$)、b), e)にはアラカシ($n=27$)、c), f)には両種のデータ($n=54$)を利用した。

して前年もっとも結果のよかった 611.4 nm は、2003 年では相関係数と偏相関係数の差が大きかった (図 3.19)。2002 年と 2003 年の両データにおいて WD との相関および偏相関が比較的強く ($|r| > 0.647$ 、 $|r_p| > 0.664$)、相関係数と偏相関係数の差が小さな波長は 505.6 nm であった (図 3.6、図 3.19)。LWC にたいして前年もっとも結果のよかった 519.6 nm は、2003 年でも相関および偏相関が比較的強く ($|r| > 0.647$ 、 $|r_p| > 0.684$)、相関係数と偏相関係数の差は小さかった ($|r_p \cdot r| < 0.050$)。LAI にたいして前年にもっとも結果のよかった 690.7 nm は、2003 年では相関および偏相関が弱かった。

2 階微分スペクトルでは、WD、LWC および LAI にたいして前年もっとも結果のよかった、それぞれ 699.6、533.5 および 676.0 nm における相関係数と偏相関係数の差が大きかった ($|r_p \cdot r| > 0.050$) (図 3.20)。

反射、1 階微分および 2 階微分スペクトルにおいて、前年データで選択基準とした、強い相関および偏相関係数をもっており ($|r|$ and $|r_p| > 0.800$)、第 3 の変数の同時的影響が小さい ($|r_p \cdot r| < 0.050$) という条件を満たす波長は存在しなかった。

3.2.3.5 最適なハイパースペクトル植生指数

渇水ストレスおよび LAI の独立した計測に最適な指数として、第 3 の変数の同時的影響が小さく ($|r_p \cdot r| < 0.050$)、できるだけ強い相関および偏相関係数をもっているものを探索した結果、WD には $S_{525.2}+S_{676.0}$ が、LWC には $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ が、LAI には $(R_{886.9}-R_{368.4})/(R_{886.9}+R_{368.4})$ が選出された (表 3.3)。ただし、 R_λ 、 F_λ および S_λ はそれぞれ波長 λ における反射率、1 階微分および 2 階微分値を示す。目的の変数と各ハイパースペクトル指数の関係を図 3.21~3.23 に示した。指数 $(R_{886.9}-R_{368.4})/(R_{886.9}+R_{368.4})$ は LAI4.0 以上で飽和傾向にあった。表 3.3 にこれらの指数とほぼ同等の検出力をもつハイパースペクトル植生指数を数個ずつあげた。同様に、目的の変数とこれらの指数の散布図を描いた結果、指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ と LAI の関係のみが、前掲の指数と変数の関係とことなる傾向を示した (図 3.24)。指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ は LAI6.0 程度まで飽和していないが、同じ LAI にたいする値が (図中では縦軸方向に) ややばらついていた。

3.2.3.6 既存の植生指数の相関および偏相関係数

WD、LWC および LAI にたいする既存の植生指数の相関および偏相関係数を表 3.4 にあげた。既存の植生指数の中でもっとも利用されている NDVI は、コナラのデータ

表 3.3 独立した変数の計測に最適なハイパースペクトル植生指数の相関係数 (r) および偏相関係数 (r_p) (コナラおよびアラカシのデータはそれぞれ n=27)

variables	indices	from <i>Q. serrata</i> data		from <i>Q. glauca</i> data		from both of the data	
		r	$r_p(-LAI)^*$	r	$r_p(-LAI)^*$	r	$r_p(-LAI)^*$
WD	$S_{525.2} + S_{676.0}$	0.866	0.867	0.868	0.876	-	-
	$S_{539.1} / S_{690.7}$	0.861	0.863	0.840	0.860	-	-
	$(R_{874.2} - R_{842.5}) / (R_{874.2} + R_{842.5})$	0.830	0.842	0.834	0.834	-	-
LWC	$(F_{502.8} - F_{852.0}) / (F_{502.8} + F_{852.0})$	-	-	-	-	0.847	0.849
	$(F_{500.0} - F_{852.0}) / (F_{500.0} + F_{852.0})$	-	-	-	-	0.833	0.839
	$(S_{497.2} - S_{676.0}) / (S_{497.2} + S_{676.0})$	-	-	-	-	0.829	0.834
	$(F_{516.8} - F_{801.3}) / (F_{516.8} + F_{801.3})$	-	-	-	-	0.828	0.828
		r	$r_p(-WD)^*$	r	$r_p(-WD)^*$	r	$r_p(-LWC)^*$
LAI	$(R_{886.9} - R_{368.4}) / (R_{886.9} + R_{368.4})$	0.909	0.919	0.907	0.907	0.893	0.894
	$(R_{890.1} - R_{368.4}) / (R_{890.1} + R_{368.4})$	0.909	0.919	0.907	0.907	0.893	0.894
	$(R_{858.4} - R_{368.4}) / (R_{858.4} + R_{368.4})$	0.909	0.921	0.906	0.906	0.893	0.895
	$S_{681.9} + S_{726.3}$	0.813	0.839	0.826	0.831	0.840	0.841

* Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

1) Values in bold show statistical significance ($p < 0.05$).

2) Values in *italic* show strong correlation ($|r|$ or $|r_p| > 0.800$).

3) R_λ , F_λ and S_λ indicate the reflectance, first derivative and second derivative at the wavelength λ , respectively.

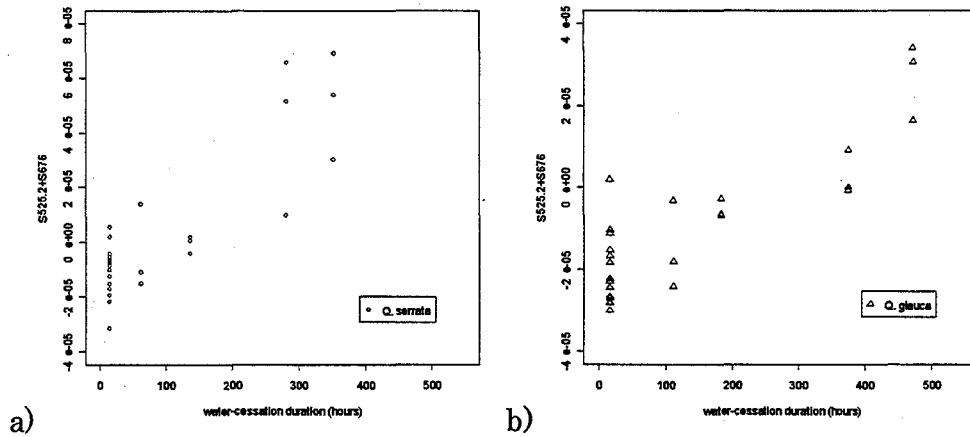


図 3.21 WD とハイパースペクトル植生指数 $S_{525.2} + S_{676.0}$ の関係。 a) コナラおよび b) アラカシ (それぞれ n=27)。

において WD との偏相関が強かった ($r_p = 0.800$)。また NDVI は LWC と中程度の偏相関をもっていた ($r_p = 0.569$)。SAVI をはじめとする NDVI の改良型指数群も、NDVI とほぼ同じ傾向を示し、WD および LWC と中程度の強さの偏相関をもっていた。また、NDVI および NDVI の改良型指数群は、LAI と強い相関および偏相関をもっていた ($|r|$ and $|r_p| > 0.800$) が、ある変数を独立に推定するために必要な条件としてあげた

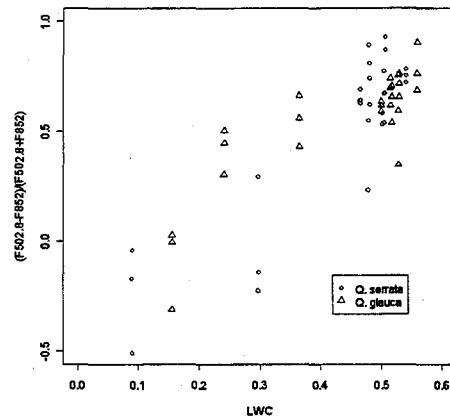


図 3.22 LWC とハイパースペクトル植生指数 $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ の関係 (n=54) .

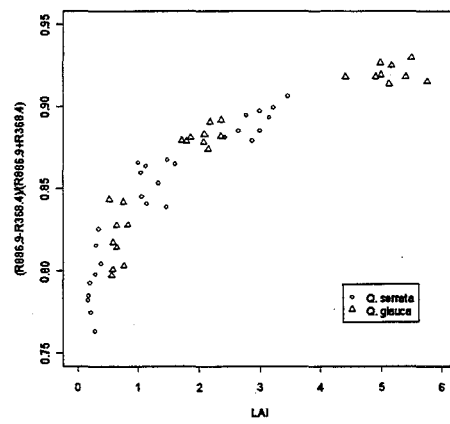


図 3.23 LAI とハイパースペクトル植生指数 $(R_{886.9}-R_{368.4})/(R_{886.9}+R_{368.4})$ の関係 (n=54) .

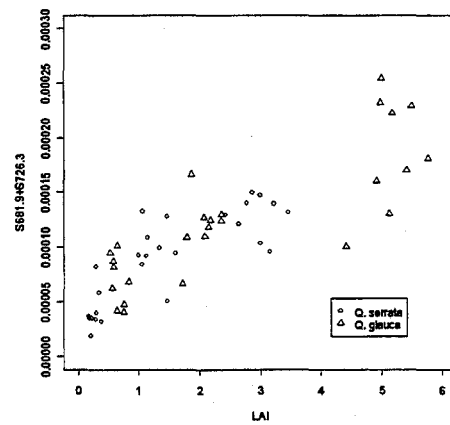


図 3.24 LAI とハイパースペクトル植生指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ の関係 (n=54) .

表 3.4 WD、LWC および LAI にたいする既存の植生指数の相関係数 (r) および偏相関係数 (r_p)
(コナラおよびアラカシのデータはそれぞれ n=27)

indices	WD from <i>Q. serrata</i> data		WD from <i>Q. glauca</i> data		LWC from both of the data	
	r	rp(-LAI)*	r	rp(-LAI)*	r	rp(-LAI)*
RVI	0.507	0.774	0.185	0.300	-0.347	-0.538
DVI	-0.388	-0.619	-0.350	-0.565	0.359	0.599
NDVI	-0.494	-0.800	-0.196	-0.353	0.333	0.569
ARVI	-0.496	-0.807	-0.209	-0.381	0.337	0.584
GEMI	-0.415	-0.663	-0.337	-0.546	0.366	0.601
RDVI	-0.443	-0.731	-0.293	-0.515	0.353	0.615
EVI	-0.436	-0.725	-0.315	-0.543	0.357	0.625
PVI	-0.406	-0.656	-0.335	-0.553	0.358	0.607
SAVI	-0.439	-0.725	-0.297	-0.520	0.354	0.614
SAVI2	-0.432	-0.770	-0.254	-0.688	0.292	0.706
TSAVI	-0.468	-0.768	-0.253	-0.451	0.347	0.598
MSAVI2	-0.427	-0.720	-0.306	-0.566	0.347	0.635
OSAVI	-0.468	-0.771	-0.253	-0.456	0.346	0.601
GESAVI	-0.424	-0.718	-0.302	-0.556	0.342	0.632
VVR	-0.502	-0.766	-0.191	-0.308	0.348	0.538
WI	-0.160	-0.158	-0.753	-0.831	0.259	0.272
PRI	0.628	0.837	0.554	0.770	-0.552	-0.785
CARI	0.766	0.872	-0.155	-0.296	-0.290	-0.368
R750R700	-0.515	-0.814	-0.284	-0.665	0.323	0.681
R750R550	-0.349	-0.671	-0.127	-0.323	0.207	0.475
SIPI	0.538	0.698	0.160	0.210	-0.390	-0.494
PSRI	0.523	0.746	0.176	0.256	-0.367	-0.528
SI	-0.156	-0.158	0.490	0.496	0.055	0.057
FDGVI	-0.587	-0.645	-0.386	-0.606	0.455	0.581
DPI	-0.738	-0.738	-0.405	-0.502	0.597	0.598
DCI	-0.345	-0.350	0.531	0.545	0.207	0.211
REP	-0.668	-0.670	-0.463	-0.469	0.446	0.462
FREP	-0.595	-0.654	-0.426	-0.654	0.470	0.604
R703REP	-0.848	-0.849	0.364	0.376	0.585	0.587
SDGVI	-0.152	-0.254	-0.352	-0.524	0.262	0.417

* Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

¹⁾ Values in **bold** show statistical significance (p<0.05).

²⁾ Values in *italic* show strong correlation ($|r|$ or $|r_p| > 0.800$).

(表 3.4 続き)

indices	LAI from <i>Q. serrata</i> data		LAI from <i>Q. glauca</i> data		LAI from both of the data	
	r	rp(-WD)*	r	rp(-WD)*	r	rp(-LWC)*
RVI	-0.776	-0.886	-0.848	-0.858	-0.800	-0.842
DVI	0.803	0.862	0.819	0.863	0.830	0.878
NDVI	0.805	0.912	0.877	0.889	0.840	0.881
ARVI	0.807	0.916	0.878	0.892	0.845	0.888
GEMI	0.802	0.871	0.822	0.862	0.823	0.873
RDVI	0.815	0.898	0.855	0.885	0.845	0.893
EVI	0.819	0.898	0.847	0.882	0.847	0.896
PVI	0.808	0.874	0.829	0.869	0.836	0.884
SAVI	0.815	0.896	0.853	0.885	0.844	0.892
SAVI2	0.845	0.926	0.945	0.970	0.927	0.961
TSAVI	0.811	0.906	0.865	0.887	0.842	0.888
MSAVI2	0.825	0.901	0.870	0.904	0.862	0.909
OSAVI	0.814	0.908	0.868	0.890	0.846	0.891
GESAVI	0.826	0.901	0.868	0.902	0.866	0.911
VVR	0.776	0.883	0.845	0.855	0.797	0.840
WI	0.211	0.210	0.458	0.661	0.424	0.432
PRI	-0.683	-0.858	-0.724	-0.849	-0.737	-0.864
CARI	-0.501	-0.752	-0.796	-0.810	-0.679	-0.701
R750R700	0.793	0.911	0.923	0.954	0.900	0.942
R750R550	0.872	0.922	0.954	0.958	0.926	0.940
SIPI	-0.664	-0.772	-0.762	-0.767	-0.662	-0.707
PSRI	-0.735	-0.848	-0.810	-0.817	-0.757	-0.803
SI	-0.065	-0.069	-0.222	-0.237	-0.076	-0.078
FDGVI	0.450	0.538	0.803	0.858	0.662	0.728
DPI	0.070	0.077	-0.540	-0.605	0.114	0.120
DCI	-0.116	-0.132	-0.284	-0.316	-0.092	-0.100
REP	0.108	0.123	0.234	0.247	0.326	0.350
FREP	0.448	0.540	0.789	0.858	0.667	0.741
R703REP	-0.022	-0.080	-0.345	-0.358	-0.033	-0.062
SDGVI	0.854	0.861	0.780	0.822	0.821	0.843

* Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

¹⁾ Values in **bold** show statistical significance ($p < 0.05$).

²⁾ Values in *italic* show strong correlation ($|r|$ or $|r_p| > 0.800$).

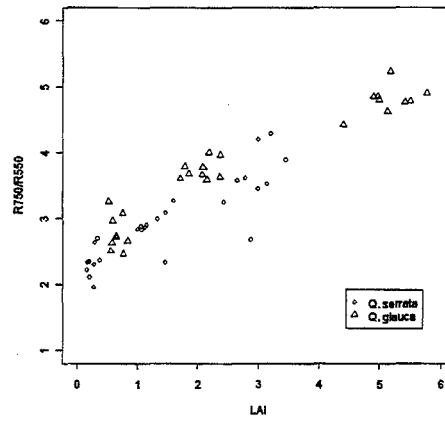


図 3.25 LAI と植生指数 $R750R550$ (R_{750}/R_{550}) の関係 (n=54) .

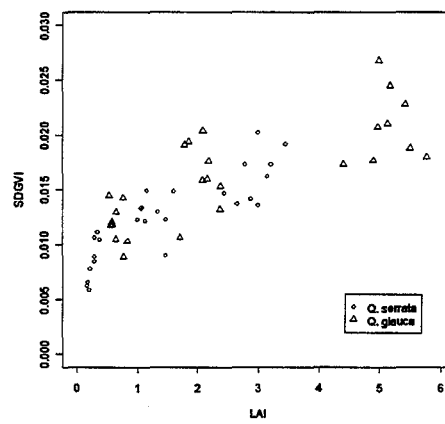


図 3.26 LAI と植生指数 SDGVI の関係 (n=54) .

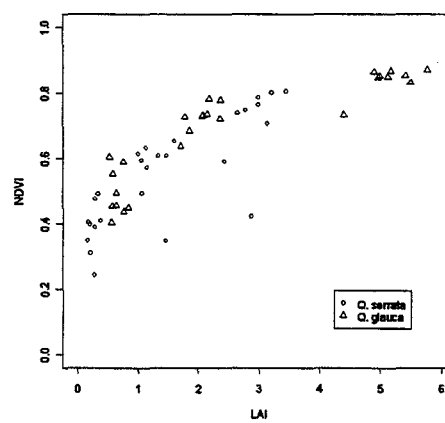


図 3.27 LAI と植生指数 NDVI の関係 (n=54) .

$|r_p \cdot r| < 0.050$ を、コナラ、アラカシおよび全データのすべてにおいて満たした指数はなかった。

WI、SI、DPI、DCI など、植生のストレスに反応する指数として提案されている指数群は、相関および偏相関が弱い、あるいは、あるデータにおいて相関が強くても他のデータにおいては相関が弱く、独立的計測のための指数としてよい結果を示さなかった。

既存の植生指数群の中で、 $|r_p \cdot r| < 0.050$ の条件をすべてのデータにおいて満たした指数は、R750R550 と SDGVI で、いずれも LAI にたいして条件を満たしていた。特に、葉のクロロフィル濃度を推定するための指数である R750R550 は、相関および偏相関係数が高く、LAI と直線的な関係をもっていた (図 3.25)。2 階微分スペクトルを利用する SDGVI は LAI と直線に近い関係をもっていたが、R750R550 よりは値がばらつく傾向があった (図 3.26)。なお、参考のために LAI と NDVI の関係を図 3.27 に示した。

3.2.3.7 波長分解能を低下させた場合のシミュレーション結果

分光放射計 SE590 の約 3 nm 間隔のデータより、10 nm 間隔のデータをシミュレートした結果、もとの波長に近い波長を選んで新しい指数としても、相関および偏相関係数が大幅に減少する場合があった (表 3.5 および表 3.6)。しかし、相関および偏相関係数の大幅な劣化 (Δr or $\Delta r_p < -0.050$) は、反射スペクトルを利用する指数では見られなかった。

3.2.3.8 渇水ストレスにともなうスペクトル変化のモデルによるシミュレーション

PROSPECT および KUUSK モデルにアラカシの実測パラメーターを入力して、渇水ストレスにともなうスペクトル変化のシミュレーションを行った。なお、モデルの LAI には実際の LAI の平均値 (5.0 および 0.7) に AR を乗じたものを、葉の乾燥物量 C_m (leaf dry matter content) には一定の値 0.0117 g/cm^2 を入力した。全モデル入力パラメーターは表 3.7 の通りである。

LAI2 段階 (高・低) と渇水ストレス 2 段階 (強・弱) によるシミュレーションの結果、反射スペクトルでは渇水ストレスにともない可視域の反射率は増加し、近赤外域の反射率は低下しており、比較的うまくシミュレートされたように見えた (図 3.28a)。しかし、1 階微分および 2 階微分スペクトルにおいて、高 LAI で渇水ストレスがかか

表 3.5 選択された植生指数の 10 nm 間隔の波長分解能のデータにおける相関および偏相関係数（コナラおよびアラカシのデータはそれぞれ n=27）。

variables	indices	from <i>Q. serrata</i> data		from <i>Q. glauca</i> data		from both of the data	
		r	$r_p(-LAI)^*$	r	$r_p(-LAI)^*$	r	$r_p(-LAI)^*$
WD	$S_{530}+S_{680}$	0.768	0.801	0.740	0.771	-	-
	S_{540}/S_{690}	0.871	0.884	0.823	0.858	-	-
	$(R_{870}-R_{840})/(R_{870}+R_{840})$	0.839	0.846	0.826	0.826	-	-
LWC	$(F_{500}-F_{850})/(F_{500}+F_{850})$	-	-	-	-	-0.252	-0.251
	$(S_{500}-S_{680})/(S_{500}+S_{680})$	-	-	-	-	0.683	0.708
	$(F_{520}-F_{800})/(F_{520}+F_{800})$	-	-	-	-	0.811	0.811
		r	$r_p(-WD)^*$	r	$r_p(-WD)^*$	r	$r_p(-LWC)^*$
LAI	$(R_{890}-R_{380})/(R_{890}+R_{380})$	0.895	0.913	0.908	0.908	0.885	0.888
	$(R_{860}-R_{380})/(R_{860}+R_{380})$	0.895	0.916	0.907	0.907	0.885	0.890
	$S_{680}+S_{730}$	0.261	0.322	0.580	0.620	0.510	0.582
LAI	R750R550	0.873	0.922	0.954	0.958	0.926	0.940
	SDGVI	0.825	0.854	0.756	0.839	0.802	0.855

* Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

1) Values in **bold** show statistical significance ($p < 0.05$).

2) Values in *italic* show strong correlation ($|r|$ or $|r_p| > 0.800$).

3) R_λ , F_λ and S_λ indicate the reflectance, first derivative and second derivative at the wavelength λ , respectively.

表 3.6 選択された植生指数の 10 nm 間隔に波長分解能が落ちることによる相関および偏相関係数の変化（コナラおよびアラカシのデータはそれぞれ n=27）。

variables	indices	from <i>Q. serrata</i> data		from <i>Q. glauca</i> data		from both of the data	
		Δr	$\Delta r_p(-LAI)^*$	Δr	$\Delta r_p(-LAI)^*$	Δr	$\Delta r_p(-LAI)^*$
WD	$S_{530}+S_{680}$	-0.098	-0.066	-0.128	-0.106	-	-
	S_{540}/S_{690}	0.010	0.021	-0.016	-0.001	-	-
	$(R_{870}-R_{840})/(R_{870}+R_{840})$	0.009	0.005	-0.009	-0.009	-	-
LWC	$(F_{500}-F_{850})/(F_{500}+F_{850})$	-	-	-	-	-1.092	-1.095
	$(S_{500}-S_{680})/(S_{500}+S_{680})$	-	-	-	-	-0.146	-0.126
	$(F_{520}-F_{800})/(F_{520}+F_{800})$	-	-	-	-	-0.017	-0.017
		Δr	$\Delta r_p(-WD)^*$	Δr	$\Delta r_p(-WD)^*$	Δr	$\Delta r_p(-LWC)^*$
LAI	$(R_{890}-R_{380})/(R_{890}+R_{380})$	-0.015	-0.006	0.001	0.001	-0.008	-0.006
	$(R_{860}-R_{380})/(R_{860}+R_{380})$	-0.014	-0.005	0.001	0.001	-0.008	-0.005
	$S_{680}+S_{730}$	-0.553	-0.516	-0.245	-0.211	-0.330	-0.258
LAI	R750R550	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	SDGVI	0.029	0.007	0.024	-0.017	0.020	-0.012

* Variables in parentheses indicate the third variable; its effect was removed in the partial correlation coefficient.

1) Values in **bold** show relatively great degradation (Δr or $\Delta r_p < -0.050$)

2) Note that 380 nm was selected as the nearest wavelength of 368.4 nm because of the simulation impracticableness at 370 nm.

表 3.7 PROSPECT および KUUSK モデルの入力パラメーター.

PROSPECT				KUUSK			
	leaf internal structure	leaf chlorophyll a + b content ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	leaf equivalent water thickness ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	leaf dry matter content (g/cm^2)	sun zenith angle	direct irradiance ratio	azimuth angle relative to the sun
	N	C_{ab}	C_w	C_m	$th0$	s/q	ϕ
high LAI and low stress	1.5	33.6	0.0135	0.0117	35	0.8	0
high LAI and high stress	1.5	21.6	0.0024	0.0117	35	0.8	0
low LAI and low stress	1.5	33.6	0.0135	0.0117	35	0.8	0
low LAI and high stress	1.5	21.6	0.0024	0.0117	35	0.8	0

KUUSK							
	LAI for model input	actual LAI	apparent leaf area ratio by leaf curling	relative leaf size	eccentricity of elliptical distribution of leaf normals	modal leaf inclination	solar zenith angle in soil reflectance measurement
	L	(LAI)	(AR)	sl	eps	thm	th^*
high LAI and low stress	4.9	5.0	0.98	0.02	0.989	0	35
high LAI and high stress	4.5	5.0	0.90	0.02	0.987	24	35
low LAI and low stress	0.686	0.7	0.98	0.02	0.989	0	35
low LAI and high stress	0.63	0.7	0.90	0.02	0.987	24	35

1) The reflectance of naturally dried Akadama soil was used for the nadir reflectance of the soil of KUUSK.

2) All the angles are expressed in degrees.

った場合、実際に観測された変化とことなり、ピークの高さが高くなったり、谷の深さが深くなっている所がレッドエッジより短波長側の可視域で見られた (図 3.28b,c)。また、強い渇水ストレス状態のシミュレーションに 410 nm 付近のピークは再現されなかった。

3.2.4 考察

3.2.4.1 渇水ストレスにともなうスペクトル変化のしくみ

渇水ストレスにともなう各パラメーターの経時的変化はつぎのようであった (図 3.9 ~ 3.15)。まず、灌水停止直後から土壌マトリックポテンシャルの上昇と木部圧ポテンシャルの低下が生じた。つぎに、コナラで灌水停止 136 時間、アラカシで 112 時間を過ぎると、葉内水分量の低下および葉の平均傾斜角度の低下が起こり、この頃から葉がカールするものが現れ始めた。そして最後に、コナラで 280 時間、アラカシで 376 時間を過ぎる頃に、クロロフィル濃度 (a+b) の大幅な低下と、クロロフィルにたいするフェオフィチン濃度の相対的な増加が始まった。

アラカシの実測値をもとにしたパラメーター (表 3.7) を PROSPECT および KUUSK モデルに入力し、渇水ストレスにともなうスペクトル変化のシミュレーションを行った。その結果、反射スペクトルでは可視域の反射率は増加し、近赤外域の反射率は低下して

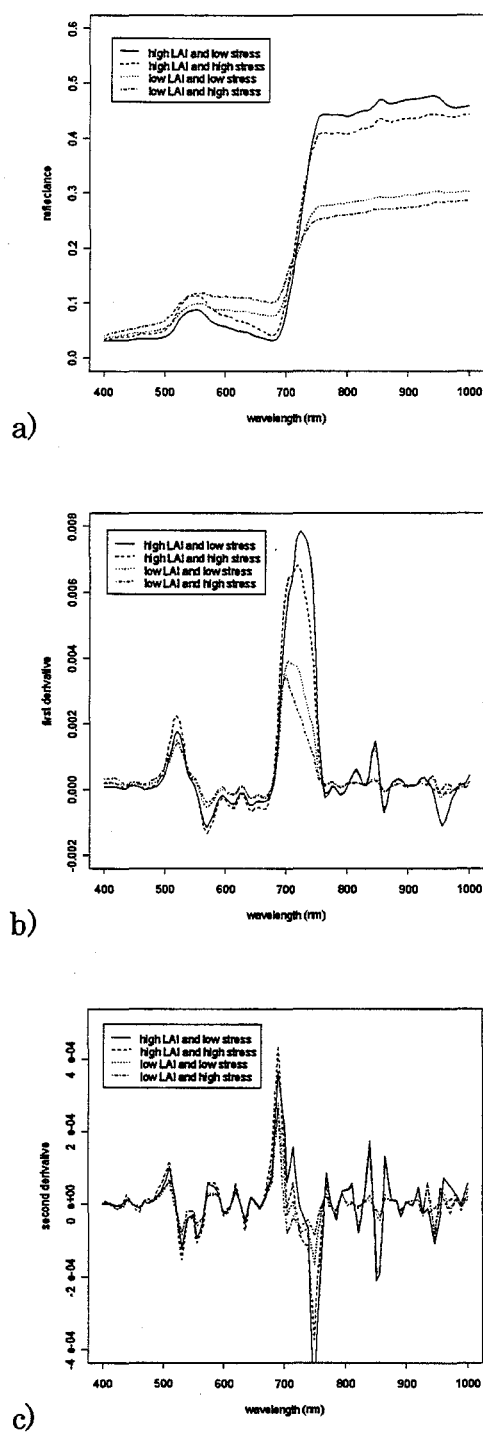


図 3.28 PROSPECT と KUUSK モデルによる LAI2 段階（高：5.0、低：0.7）と渇水ストレス 2 段階（強：アラカシ灌水停止 472 時間後、弱：アラカシ灌水停止 16 時間後）のシミュレーション結果。 a) 反射スペクトル、b) 1 階微分スペクトル、c) 2 階微分スペクトル。

おり、クロロフィル濃度、AR、葉の傾斜角の分布の変化がこれらの変化を生じさせたことが確認された。なお、Ceccato et al. (2002)によって約 1100 nm までの可視域および近赤外域において PROSPECT の葉内水分量の寄与は少ないことが明らかにされている。

しかし、1 階微分および 2 階微分スペクトルでは、渇水ストレスにともないピークの高さが高くなったり、谷の深さが深くなったりしている波長域が見られるなど、実際の観測結果とことなる所が見られた。これは SAIL モデル (Verhoef, 1984) の散乱フラックスの処理方法を取り入れている KUUSK モデルにおいて、樹冠が、均質な水平方向に無限に広がる層として仮定されているためであると考えられる。すなわち、実際の樹冠層の葉の分布はある程度かたまりを作っているため、LAI や葉傾斜角度が低下すると地面が直接見える部分が増加するという現象が起こる。これがシミュレーション結果と実測結果の不一致の原因のひとつであると考えられる。

また、強い渇水ストレス状態のシミュレーションに 410 nm 付近のピークは再現されなかった。これは、クロロフィル濃度の低下と樹冠の構造の変化だけでは、410 nm 付近のピークの出現を説明できないことを示している。したがって、410 nm 付近のピークは、クロロフィルがフェオフィチンへと変化することによって、相対的にフェオフィチン濃度が高まり、これによって 410 nm 付近から短波長側により強い吸収が生じ、出現したのではないかと考えられる。クロロフィル a/フェオフィチン a 比の減少はこの仮説を裏づける証拠のひとつであると思われる。

3.2.4.2 渇水ストレス計測のための単バンドの利用

反射スペクトルにおける、年度間および樹種間の相関および偏相関スペクトルの相違は、反射スペクトルが不安定であり、単バンドでの利用が困難であることを示唆した。2002 年と 2003 年の両データを通して、WD および LWC との相関が比較的強く、相関係数と偏相関係数の差が小さな波長は、それぞれ 1 階微分スペクトルの 505.6 nm ($|r| > 0.647$ 、 $|r_p| > 0.664$) と 519.6 nm ($|r| > 0.647$ 、 $|r_p| > 0.684$) であった。したがって、単バンドにより渇水ストレスを計測するのであれば、1 階微分スペクトルにおける緑域を利用するのがよいのではないかとと思われる。しかし、全体的に、2002 年および 2003 年の相関および偏相関分析の結果からは、単バンドの利用は相関および偏相関が弱く、あまりよい方法ではないように思われた。

3.2.4.3 渇水ストレスおよび LAI の独立した計測のための植生指数

既存の植生指数と WD、LWC および LAI との相関および偏相関係数を求めた結果、現在もっともよく利用されている NDVI および NDVI の改良型指数群は、LAI と強い相関および偏相関をもっていた。しかし、これらの指数は、ある変数を独立に推定するために必要な条件としてあげた $|r_p \cdot r| < 0.050$ を満たさず、LAI の推定に際して渇水ストレスの影響を比較的大きく受けることが明らかとなった。また、これまで植生のストレスに反応する指数として提案されている WI、SI、DPI、DCI、REP など、渇水ストレスの独立的計測のための指数として適当でなかった。既存の植生指数の中で、第 3 の変数の同時的影響が小さい ($|r_p \cdot r| < 0.050$) という条件をすべてのデータにおいて満たした指数は、R750R550 と SDGVI だけであり、いずれも LAI にたいする指数として選択された。特に、葉のクロロフィル濃度を推定するための指数である R750R550 は、相関および偏相関係数が高く ($r = 0.872 \sim 0.954$ 、 $r_p = 0.922 \sim 0.958$)、LAI と直線的な関係をもっていた (図 3.25)。一方、渇水ストレスを独立に計測するために適当な指数は、本研究で検討した既存の植生指数に存在しなかった。

2 つのバンドの組み合わせを総当たりで最適なハイパースペクトル植生指数を探索した結果、表 3.3 にあげた指数が選び出された。すべてのこれらの指数は、相関および偏相関が強く ($|r|$ and $|r_p| > 0.800$)、第 3 の変数の同時的影響が小さい ($|r_p \cdot r| < 0.050$) という条件を満たしている。したがって、これらの指数を利用すれば、LAI の同時的影響を最小限にした渇水ストレスの計測が可能である。例えば、最後の灌水からの経過時間によって渇水ストレスを評価するのであれば、WD の独立的計測に最適な指数として選ばれた $S_{525.2} + S_{676.0}$ 等を利用し、葉内水分量の変化として渇水ストレスを評価するのであれば、LWC の独立的計測に最適な指数として選ばれた $(F_{502.8} - F_{852.0}) / (F_{502.8} + F_{852.0})$ 等を利用するということが考えられる。

また、渇水ストレスの同時的影響を最小限にした LAI の計測のための指数として、 $(R_{886.9} - R_{368.4}) / (R_{886.9} + R_{368.4})$ や $S_{681.9} + S_{726.3}$ が選択された。しかし、指数 $(R_{886.9} - R_{368.4}) / (R_{886.9} + R_{368.4})$ の LAI との相関係数や偏相関係数 ($r = 0.893 \sim 0.909$ 、 $r_p = 0.894 \sim 0.919$) は、既存の植生指数である R750R550 ($r = 0.872 \sim 0.954$ 、 $r_p = 0.922 \sim 0.958$) とほぼ同等であるが、LAI4.0 以上で飽和傾向にあった。また、指数 $S_{681.9} + S_{726.3}$ の LAI との相関係数や偏相関係数 ($r = 0.813 \sim 0.840$ 、 $r_p = 0.831 \sim 0.841$) は、R750R550 よりもやや劣っていた。本研究のデータに限れば、LAI を独立的に計測するためには R750R550 がもっとも優れた指数であると言える。

3.2.4.4 選択された植生指数の反応機構

独立的計測のために選択されたハイパースペクトル指数の反応機構を以下に考察する。WD の独立的計測のための指数 $S_{525.2}+S_{676.0}$ および $S_{539.1}/S_{690.7}$ は、1 階微分スペクトルで言えば緑域のピークの長波長側の斜面の傾きと、レッドエッジの短波長側の斜面の傾きを利用している（図 3.29、3.30）。渇水ストレスを強く受けると、1 階微分スペクトルにおける緑域のピークの長波長側の斜面は右下がりのやや急な傾きから緩やかな傾きに、レッドエッジの始まりの斜面はブルーシフトの影響で右上がりにやや急な傾きから急な傾きになる。このため、指数 $S_{525.2}+S_{676.0}$ および $S_{539.1}/S_{690.7}$ は渇水ストレスを受けるとより大きな値を示す。LAI の影響は、2 つの波長を足し合わせたり、割ったりすることにより打ち消される。

もうひとつの WD の独立的計測のための指数 $(R_{874.2}-R_{842.5})/(R_{874.2}+R_{842.5})$ は、反射スペクトルの近赤外域を利用する（図 3.31）。この領域の反射スペクトルは強い渇水ストレスを受けると、平坦から右上がりの斜面へと変化するので、 $R_{874.2}-R_{842.5}$ はほとんど 0 から正の値へと変わる。なお、 $R_{874.2}+R_{842.5}$ で除することにより LAI によって大きく異なる反射率の違いが消される。

LWC の独立的計測のための指数 $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ は、反射スペクトルで言えば、緑域のピークの短波長側の斜面の傾きと、近赤外域の傾きを利用する（図 3.32）。先ほどと同様に、強い渇水ストレスを受けると、近赤外域の反射スペクトルは平坦から右上がりの斜面へと変化する。これに応じて 1 階微分値 $F_{852.0}$ は大きくなる。一方、 $F_{502.8}$ は渇水ストレスを受けたり、LAI が下がると値が小さくなる。したがって、渇水ストレスを受け、葉内水分量が減少すると $F_{502.8}-F_{852.0}$ は小さな値をとるようになる。なお、LAI の影響は正規化することによって抑えられる。指数 $(F_{500.0}-F_{852.0})/(F_{500.0}+F_{852.0})$ および指数 $(F_{516.8}-F_{801.3})/(F_{516.8}+F_{801.3})$ でも同様の機構により LWC の独立的計測が可能になっている。

LWC の独立的計測のための指数 $(S_{497.2}-S_{676.0})/(S_{497.2}+S_{676.0})$ は、1 階微分スペクトルで言えば緑域のピークの短波長側の斜面の傾きと、レッドエッジの短波長側の斜面の傾きを利用している（図 3.33）。渇水ストレスを強く受けると、1 階微分スペクトルにおける緑域のピークの短波長側の斜面は右上がりに緩やかになり、レッドエッジの短波長側の斜面はブルーシフトの影響で右上がりに急になる。このため、指数 $S_{497.2}-S_{676.0}$ は小さな値になる。なお、正規化により LAI の影響が打ち消される。

LAI の独立的計測のための指数 $(R_{886.9}-R_{368.4})/(R_{886.9}+R_{368.4})$ は、反射スペクトルの青紫域

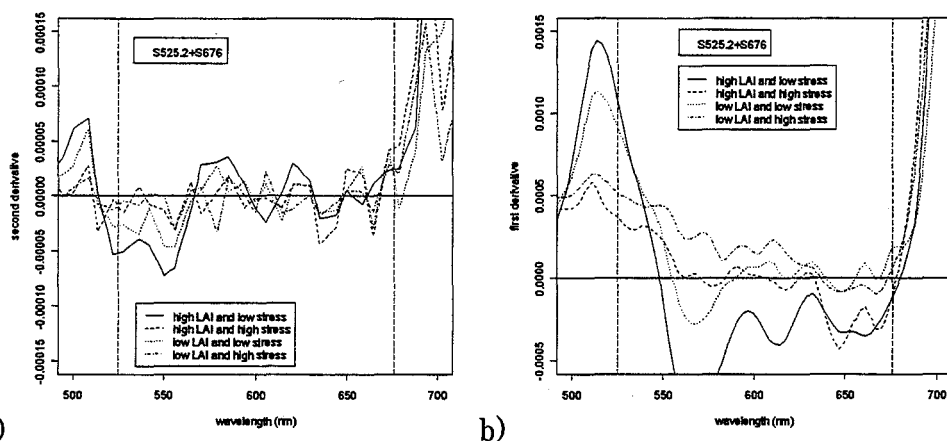


図 3.29 WD 指数 $S_{525.2}+S_{676.0}$ の利用する波長付近の a) 2 階微分および b) 1 階微分スペクトルの変化。2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した。垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

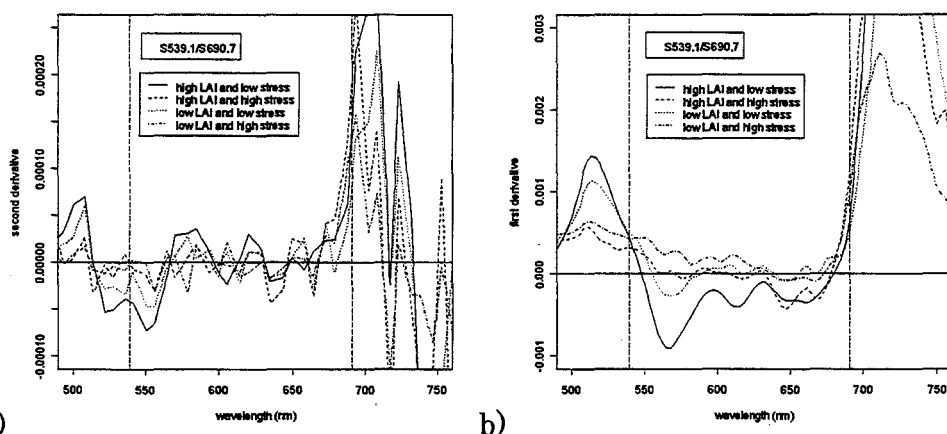


図 3.30 WD 指数 $S_{539.1}/S_{690.7}$ の利用する波長付近の a) 2 階微分および b) 1 階微分スペクトルの変化。2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した。垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

と近赤外域を利用している (図 3.34)。LAI が増加すると、反射スペクトルの青紫域は反射率が減少し、近赤外域は増加する。このため、 $R_{886.9}-R_{368.4}$ は大きな値となる。なお、 $R_{886.9}+R_{368.4}$ で除する正規化により渇水ストレスの影響が打ち消される。指数 $(R_{890.1}-R_{368.4})/(R_{890.1}+R_{368.4})$ および $(R_{858.4}-R_{368.4})/(R_{858.4}+R_{368.4})$ も、同様の反応機構に拠っている。

LAI の独立的計測のための指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ は、1 階微分スペクトルで言えば、レッドエッジの短波長側の斜面の傾きと第 2 レッドエッジピークの短波長側の斜面の傾きを利用している (図 3.35)。この 2 つの波長は渇水ストレスによるブルーシフトの影響

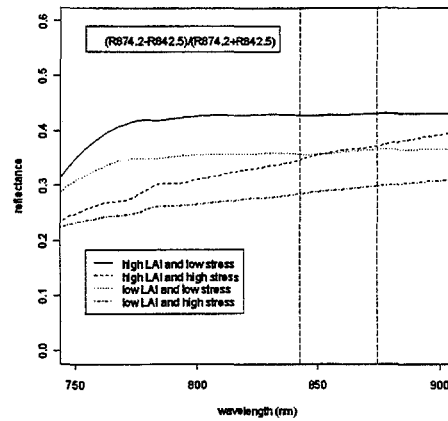


図 3.31 WD 指数 $(R_{874.2}-R_{842.5})/(R_{874.2}+R_{842.5})$ の利用する波長付近の反射スペクトルの変化. 2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した. 垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

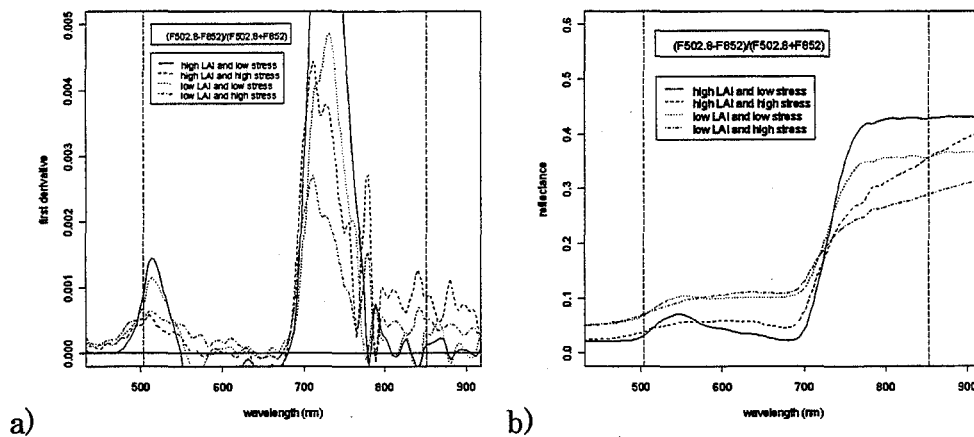


図 3.32 LWC 指数 $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ の利用する波長付近の a) 1 階微分および b) 反射スペクトルの変化. 2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した. 垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

を受ける。渇水ストレスを受けるとレッドエッジの短波長側の斜面は右上がりに緩やかな傾きから急な傾きとなり、第 2 レッドエッジピークの短波長側の斜面は、右上がりに急な傾きから緩やかな傾きになる。したがって、指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ は、どのような渇水ストレス条件のもとでも LAI が同じであれば、ほぼ同じ値を示す。このように、指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ は渇水ストレスの影響を $S_{681.9}$ および $S_{726.3}$ における増減のバランスで相殺する複雑な機構をもつ。なお、LAI が増加すると 2 つの値の和は大きくなる。

既存の植生指数の中から LAI の独立的計測のためにふさわしい指数として選ばれた $R_{750}R_{550}$ (R_{750}/R_{550}) は、反射スペクトルにおける緑域とレッドエッジの頂上付近の

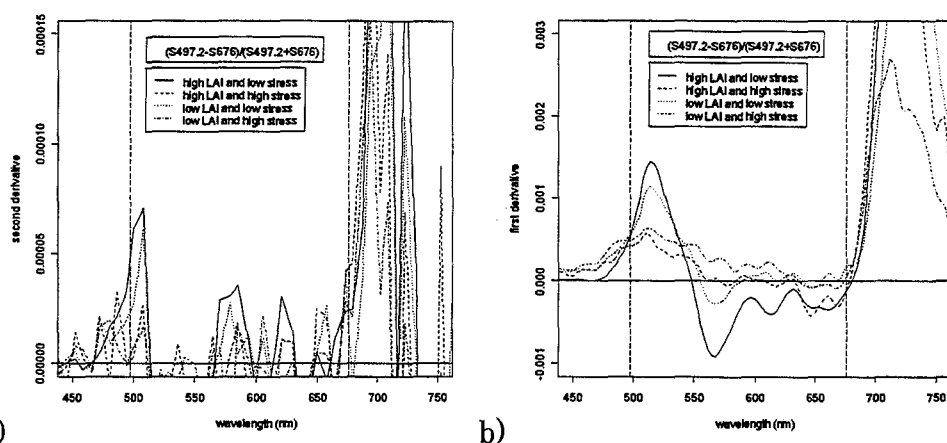


図 3.33 LWC 指数 $(S_{497.2}-S_{676.0})/(S_{497.2}+S_{676.0})$ の利用する波長付近の a) 2 階微分および b) 1 階微分スペクトルの変化. 2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した. 垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

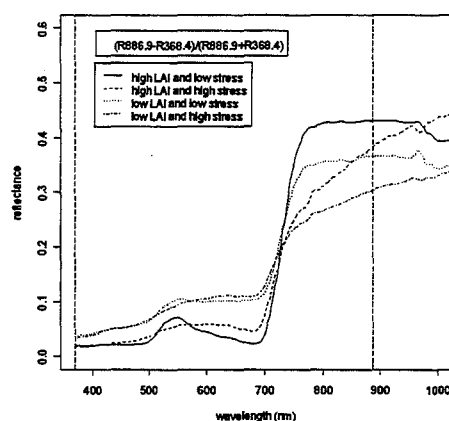


図 3.34 LAI 指数 $(R_{886.9}-R_{368.4})/(R_{886.9}+R_{368.4})$ の利用する波長付近の反射スペクトルの変化. 2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した. 垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

反射率を利用している (図 3.36)。LAI が増加すると、緑域を含む可視域の反射率は減少し、レッドエッジの頂上付近の反射率は増加する。このため、 R_{750}/R_{550} は大きな値となる。なお、同じ LAI で渇水ストレスを受けても、緑域およびレッドエッジの頂上付近の反射率は同程度に減少するため、 R_{750}/R_{550} の値はほとんど変化しない。

既存の植生指数から選ばれたもうひとつの LAI 指数 SDGVI は、レッドエッジピークを含む 626 から 795 nm における 2 階微分値の絶対値の積分値である (図 3.37)。つまり、2 階微分値が 0 の水平線と 2 階微分スペクトルにはさまれた部分の面積を利用している。LAI が増加すると、レッドエッジピークが高くなり SDGVI の値が大きくなる。

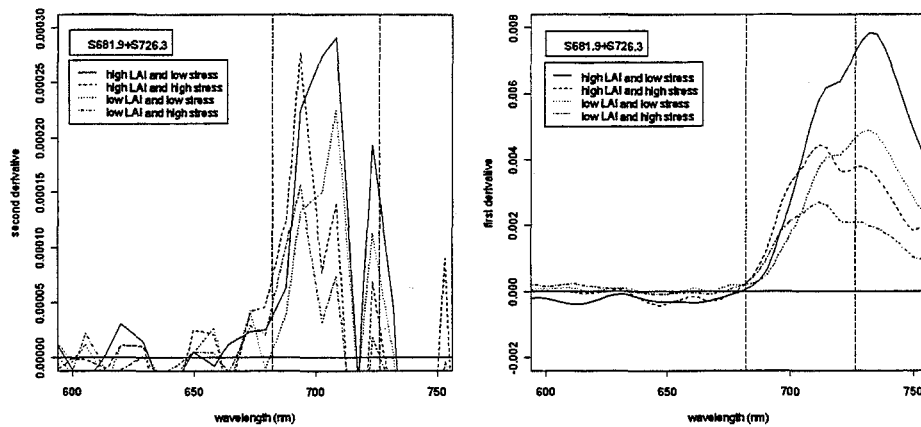


図 3.35 LAI 指数 $S_{681.9}+S_{726.3}$ の利用する波長付近の a) 2 階微分および b) 1 階微分スペクトルの変化。2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した。垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

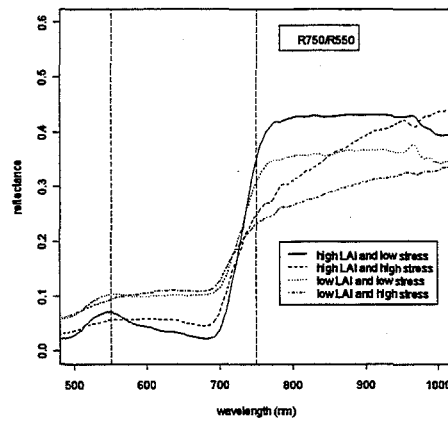


図 3.36 LAI 指数 R_{750}/R_{550} (R_{750}/R_{550}) の利用する波長付近の反射スペクトルの変化。2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した。垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

また、同じ LAI でも渇水ストレスを受けると、1 階微分スペクトルのレッドエッジピークは低くなり SDGVI は小さくなる方向の影響を受ける。しかし、渇水ストレスを受けた植生の 1 階微分スペクトルは小さな凸凹を多く含むスペクトルになるため、逆に SDGVI は大きくなる方向の影響も受け、結果的に SDGVI では渇水ストレスの影響が相殺される。

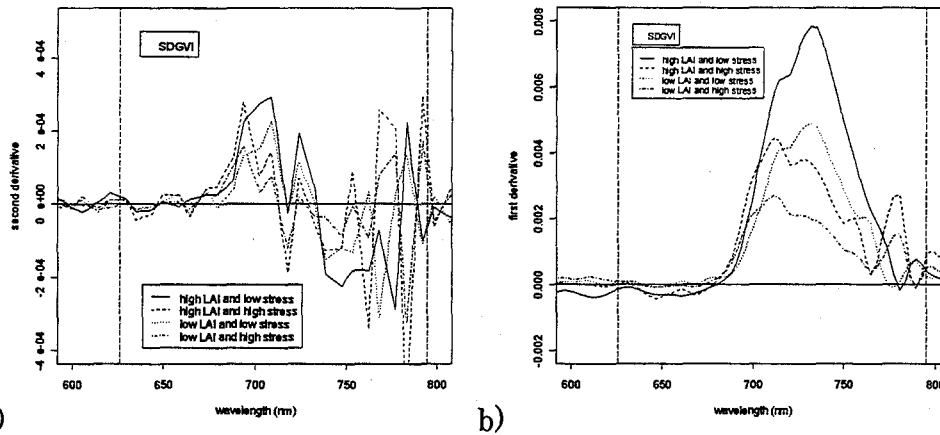


図 3.37 LAI 指数 SDGVI の利用する波長付近の a) 2 階微分および b) 1 階微分スペクトルの変化。2003 年 11 月 12 日のアラカシのスペクトルを示した。垂直の破線は当該指数で利用している波長を表す。

3.2.4.5 波長分解能や土壌バックグラウンド効果の影響

センサーの波長分解能が劣る場合、もとの波長にできるだけ近い波長を選んで使用することが考えられる。このような場合に、独立的計測のための植生指数が、目的の変数をどれくらいの相関および偏相関係数をもって計測が可能なのかをシミュレートした(表 3.5)。その結果、もとの波長に近い波長を選んで新しい指数としても、場合によっては相関および偏相関係数が大幅に減少する可能性があることが明らかとなった。この劣化は反射スペクトルを利用する指数では比較的小さかったが、これは反射スペクトルが波長に沿って滑らかであるためであると考えられる。波長に沿ってスペクトルの変動が激しい 1 階微分スペクトルや 2 階微分スペクトルでは、近い波長として選択した波長で指数が機能するのか、事前にチェックしておく必要があると思われる。また、反射スペクトルでも変動の激しい波長域では、同様のチェックが必要であろう。さらに、本研究ではセンサーの波長間隔だけを変化させてシミュレートしたが、これに加えセンサーによって半値幅が異なる場合は、この影響も考慮されるべきである。

一方、微分スペクトルは照射光の変化や土壌のバックグラウンド効果の影響を受けにくいという特長をもつ。しかし、反射スペクトルを利用する指数は、除算型や正規化差分型の指数であれば照射光の変化を受けにくいと考えられるが、土壌の反射スペクトルの影響は避けられない。反射スペクトルを利用する植生指数では、事前に目的の土壌反射スペクトルでも指数が機能するのかをシミュレートするほうがよいと考えられる。しかし、現在のところ、この目的のために、渇水ストレス、LAI および土壌の反射スペク

トルを同時に評価し、樹冠レベルでの反射（および微分）スペクトルを正確にシミュレートできるモデルは存在しない。

このように、反射スペクトルを用いる指数ではおもに土壌のバックグラウンド効果について、微分スペクトルを用いる指数ではおもに波長分解能の影響について注意しながら、指数を利用する必要がある。

3.2.5 まとめ

コナラおよびアラカシの模型群落実験の実測値と PROSPECT+KUUSK モデルより、渇水ストレスにともなうスペクトルの変化には、クロロフィル濃度、葉の見かけの大きさの比率、葉の傾斜角の分布の変化が寄与していることが明らかとなった。しかし、PROSPECT+KUUSK モデルでは、渇水ストレスにともなう反射および微分スペクトルの変化を再現する際の限界があることがわかった。それは、樹冠を均質な水平方向に無限に広がる層として仮定していること、クロロフィル以外の葉内色素（おそらくはフェオフィチン）の作用を考慮していないことである。

現在、既存の植生指数のなかでもっともよく利用されている NDVI および NDVI の改良型指数群は、LAI の推定に際して渇水ストレスの影響を比較的大きく受けることがわかった。また、これまで植生のストレスに反応する指数として提案されている WI、SI、DPI、DCI など、渇水ストレスの独立的計測のための指数として適当ではなかった。既存の植生指数の中で、第3の変数の同時的影響が小さいという条件をすべてのデータにおいて満たした指数は、R750R550 と SDGVI だけで、いずれも LAI にたいする指数として選択された。結局、本研究では、渇水ストレスを独立に計測するために適当な既存の植生指数は存在しなかった。この結果は、これまでの植生指数開発においては、目的変数との相関が重視され、目的外の変数の同時的影響をあまり考慮して来なかったことを意味すると思われる。

2 つのバンドの組み合わせの総当たりにより最適なハイパースペクトル植生指数を探索した結果、表 3.3 にあげた指数を用いれば、LAI の同時的影響を最小限にして渇水ストレスの計測を行うことが可能であることがわかった。WD および LWC の独立的計測のために最適な植生指数は、それぞれ $S_{525.2}+S_{676.0}$ および $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ であった。また、LAI の独立的計測のためには、葉のクロロフィル濃度を測定するための指数 R750R550 (R_{750}/R_{550}) がもっとも有効であった。

これらの指数を実際に適用する場合には、1) 反射スペクトルを利用する指数では土

壤バックグラウンドの影響を事前に評価する、2) 微分スペクトルを利用する指数ではセンサーの観測波長および半値幅の違いによる影響を事前に評価することが必要である。なお、現在得られている知見で可能な検討は 2) のみである。2) は使用するセンサーの仕様ごとにその都度、検討すればよいであろう。今後は、1) の検討を可能にし、また微分スペクトルの特性を精査するために、本研究で明らかとなった PROSPECT+ KUUSK モデルの改良検討課題について研究を進めることが重要である。

第4章 結論：緑地診断・管理における利用に向けて

植生の渇水ストレス状態の計測は、緑地の診断や管理に欠かせない。しかし、現在、緑化状況のモニタリングにもっとも広く使われている NDVI やそれを改良した植生指数は、渇水ストレス状態と樹冠の粗密の影響を同時に受け、必ずしも渇水ストレス状態をよく反映した指数ではない。そこで、本研究は、蒸散を介して渇水ストレスと直接的な関係をもつ熱慣性特性値 (TRN)や、樹冠の詳細な反射特性のわかるハイパースペクトルデータを利用し、植生の渇水ストレスを計測するための最適な指数を求めることを目的とした実験を行った。

TRN に関する実験からは、航空機搭載の熱赤外センサー（相対精度 0.1 °C）を用いて、夜明け頃と 9:00～11:30 に 2 回の地表面温度を観測し、地上で同時測定した下向き短・長波放射量とあわせて算出される TRN(dawn)により、LAI が約 4 の植生の渇水ストレスの有無が測定できる可能性が示された。また、地表面温度と気温のほぼ一致する夜明け頃の気温と、ASTER あるいは TABI 同等センサーによる 9:00～11:30 の間の観測から求められる ATRN によつては、LAI が約 4 でアラカシのように渇水ストレスの違いが葉温によく表れる群落について、渇水ストレスの有無を計測できる可能性があることがわかった。

ハイパースペクトルデータを利用した実験からは、既存の植生指数のなかでもっともよく使われている NDVI および NDVI の改良型指数は、LAI の推定に際して渇水ストレスの影響を大きく受け、LAI の独立した計測に不向きであることが明らかになった。また、植生のストレスに反応する指数として提案されている WI、SI、DPI、DCI など、渇水ストレスの独立的計測のための指数として適当ではなかった。LAI を独立に計測するために適していると考えられた既存の植生指数は、 $R_{750R550}$ (R_{750}/R_{550}) と SDGVI だけであり、本研究では $R_{750R550}$ がもっとも有効であった。

また、既存の植生指数とことなり、ハイパースペクトルを利用した植生指数には、渇水ストレスを独立に計測することができる指数が存在することが明らかとなった。本研究において灌水停止時間 (WD) および葉内水分量 (LWC) の独立的計測に最適な植生指数は、それぞれ $S_{525.2}+S_{676.0}$ および $(F_{502.8}-F_{852.0})/(F_{502.8}+F_{852.0})$ であった。これらのハイパースペクトル植生指数は、葉の構造や厚さの比較的事となるコナラとアラカシの群落にたいして、渇水ストレスの独立的計測に有効であったことから、多くの広葉樹の群落にたいする適用可能性をもっていると考えられる。今後、他のデータセットとあわせて分

表 4.1 各種センサーの仕様.

platform	satellite Terra	satellite EO-1	airplane	helicopter	airplane	airplane or helicopter
sensor	ASTER	Hyperion	TABI	thermal image camera IR-M700	CASI	AHHIS
sensor type	multispectral	hyperspectral	thermal	thermal	hyperspectral	hyperspectral
spectral range	VIS, NIR, SWIR, TIR	400 - 2400 nm	8 - 12 μ m	8 - 12 μ m	400 - 1050 nm	390 - 840 nm
number of bands	14	220	1	1	288	384
band interval (nm)	-	10	-	-	2.5	1.17
noise equivalent differential temperature ($^{\circ}$ C)	0.3(TIR)	-	0.1	0.1	-	-
spatial resolution (m)	15(VIS, NIR), 30(SWIR) or 90(TIR)	30	6 by 9 ^{a)}	0.4 ^{b)}	1 ^{a)}	0.6 ^{b)}
swath (km)	60	7.5	1.8 ^{a)}	0.25 ^{b)}	1.6 ^{a)}	0.36 ^{b)}

a) at 2000-meter-high operation

b) at 500-meter-high operation

析をすすめれば、さらに広い適用範囲で渇水ストレスの独立的計測に最適な指数を選択することができるであろう。

以上のように、TRN、ATRN およびハイパースペクトル植生指数は、それぞれ適用可能な植生や天候等に条件があるものの、植生の渇水ストレスの計測に有効であることが示された。

これらの指数を緑地の診断や管理において利用するためには、緑地の規模、計測単位の大きさ（群落単位か単木単位か）によって、渇水ストレス計測の実施方法がことなってくるであろう。代表的なセンサーの仕様を表 4.1 にまとめた。

数百 ha 以上の大規模な緑地を、群落単位（30～90 m 程度の空間解像度）で診断、管理する場合、Terra/ASTER を用いて ATRN を算出することや、EO-1/Hyperion を用いてハイパースペクトル植生指数を求めることが考えられる。ATRN を評価するためには、同一画像内に比較対照とする植生が必要であるので、ASTER の可視、近赤外バンドによって LAI を推定したり、その他のバンドも利用して樹種を分類しておく必要があるかもしれない。LAI の推定に、Hyperion のハイパースペクトルデータに、本研究で有効性が明らかとなった指数 $R_{750R550}$ (R_{750}/R_{550}) を適用すれば、さらに精度の高い LAI を求められるであろう。Hyperion のデータにハイパースペクトル指数を適用すれば、比較的高い空間解像度（30 m 程度）で、独立的に緑地の渇水ストレス状態を計

測することが可能である。また、ASTER や Hyperion といった衛星搭載センサーは、低コストで定期的な観測が可能であるので、晴天の多い地方では、緑化状況のモニタリングに適した手段である。

数百 ha 未満の小規模な緑地を、群落あるいは単木単位 (0.4~10 m 程度の空間解像度) で診断、管理する場合、TABI 等の航空機熱赤外センサーやヘリコプターの熱画像カメラを用いて TRN (dawn) あるいは ATRN を算出する方法、CASI (航空機搭載センサー) や AAHIS (航空機あるいはヘリコプター搭載センサー) 等のデータからハイパースペクトル植生指数を求める方法が考えられる。とくにヘリコプターの熱画像カメラや CASI、AAHIS は、数十センチから 1 m 程度の高い空間分解能をもつので、単木単位の評価が可能である。これらの詳細なデータは、面的に広がる緑地だけでなく、並木や街路樹の診断、管理にも利用できると考えられる。

TRN や ATRN と、ハイパースペクトル植生指数は、それぞれの特徴を考えて利用するのがよいと思われる。すなわち、TRN や ATRN は蒸散速度の違いを捉えているので、蒸散や光合成活動など植物の物質生産活動の観点から渇水ストレスを計測する指数であると考えられる。ハイパースペクトル植生指数は葉内色素の濃度、葉の見かけの大きさの比率、葉の傾斜角の分布の変化を捉えているので、葉内水分量や葉内色素濃度の変化など樹木の生育ポテンシャルの観点から計測する指数であると考えられる。また、ハイパースペクトル植生指数は、樹木の葉の見た目といった緑地利用者の視覚的評価に近い観点から渇水ストレスを計測しているという解釈も可能かもしれない。TRN あるいは ATRN と、ハイパースペクトル植生指数を併用すれば、別の切り口によって緑地の渇水ストレス状態を診断できるであろう。

最後に、TRN や ATRN、ハイパースペクトル植生指数を利用する際の注意点をいくつかまとめておく。TRN や ATRN の利用に際しては、観測の 2 分程度前から日射量が安定していること、同一画像内に対照とする植生が存在すること、比較しようとする区域の相対湿度や風速、観測角度がほぼ同じであること、微風で風速の安定した天候であることが必要である。また、TRN (dawn) や ATRN の適用可能な植生は、センサーの雑音等価温度や絶対温度精度と関係しており、すべての植生について渇水ストレスの計測が可能であるわけではない。ハイパースペクトル植生指数の利用に際しては、反射スペクトルを利用する指数では土壌バックグラウンドの影響を事前に評価すること、微分スペクトルを利用する指数ではセンサーの観測波長および半値幅の違いによる影響を事前に評価することが必要である。また、適用可能な植生は広葉樹に限られることに注

意するべきである。

本研究により、TRN、ATRN およびハイパースペクトル植生指数は、それぞれ適用可能な植生や天候等に条件があるものの、植生の渇水ストレスの計測に有効であることが示された。今後は、他の樹種や樹冠タイプ、土壌バックグラウンドをもつ群落にたいしてフィールドあるいはシミュレーションによる実験を行い、これらの指数の適用範囲をさらに広げるための研究を行う必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの先生方、友人、後輩の力をいただいたことに感謝します。とくに終始貴重な助言をくださった森本幸裕先生、ゼミなどでご指導をいただいた柴田昌三先生、吉田鐵也先生、村上修一先生、実験を手伝ってくださった杉本香葉子さん、牧野亜友美さん、磯田一岳君にはたいへんお世話になり、本当にありがとうございました。また、TDRの較正方法や熱電対について教えてくださった中村彰宏先生（大阪府立大学大学院農学生命科学研究科）、笹木義雄さん、蒸散速度や木部圧ポテンシャルの計測について教えてくださった小杉緑子先生（京都大学大学院農学研究科）、TRNについて有益なアドバイスを下さった小川健太さん（USDA/ARS（当時））、西田顕郎先生（筑波大学農林工学系）、クロロフィル濃度の計測について教えてくださった宮下英明先生（京都大学大学院地球環境学堂）、宮沢良行さん（京都大学農学研究科）、圃場での作業を手伝っていただきましたフィールド科学教育研究センターの技官の方々に感謝します。このほか名前をあげられなかった皆様にも、数々のご助力をいただいたことに感謝します。

なお、本研究の一部は都市緑化技術開発機構の助成金を受けて行ったことをここに記します。

参考文献

- Ansari, A. Q., and Loomis, W. E. 1959. Leaf temperatures. *American Journal of Botany*, 46: 713-717.
- Bannari, A., Huete, A. R., Morin, D., and Zagolski, F. 1996. Effects of soil color and brightness on vegetation indexes. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10): 1885-1906.
- Baret, F. and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
- Baret, F., Guyot, G., and Major, D. 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In *12th Canadian Symp. on Remote Sensing and IGARSS'90*, Vancouver, Canada, 10-14 July 1989, 1355-1358.
- Baret, F., Jacquemoud, S., and Guyot, G. 1992. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. *Remote Sensing of Environment*, 41: 133-142.
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K. and Thomsen, A. 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81: 179-193.
- Bonham-Carter, G. F. 1988. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data. *Computers and Geosciences*, 14(3): 339-356.
- Boochs, F., Kupfer, G., Dockter, K. and Kuhbauch, W. 1990. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10): 1741-1753.
- Broge, N. H., and Leblanc, E. 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76: 156-172.
- Carlson, T. N., and Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62: 241-252.
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B., and Tarantola, S. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part I Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82: 188-197.
- Clevers, J. G. P. W., De Jong, S. M., Epema, G. F., Van Der Meer, F. D., Bakker, W. H., Skidmore, A. K., and Scholte, K. H. 2002. Derivation of the red edge index using the MERIS standard band setting. *International Journal of Remote Sensing*, 23(16): 3169-3184.
- Collins, W., Chang, S-H., Raines, G., Canney, F., and Ashley, R. 1983. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits. *Economic Geology*, 78: 737-749.

- Curran, P. J., Dungan, J. L., and Gholz, H. L. 1990. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7: 33-48.
- Curran, P. J., Windham, W. R., and Gholz, H. L. 1995. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine leaves. *Tree Physiology*, 15: 203-206.
- Danson, F. M., Steven, M. D., Malthus, T. J., and Clark, J. A. 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing*, 13(3): 461-470.
- Danson, F. M., and Plummer, S. E. 1995. Red-edge response to forest leaf area index. *International Journal of Remote Sensing*, 16(1): 183-188.
- Dawson, T. P., and Curran, P. J. 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11): 2133-2139.
- Demetriades-Shah, T. H., Steven, M. D., and Clark, J. A. 1990. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 33: 55-64.
- Elvidge, C. D. and Chen, Z. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 54: 38-48.
- Ferns, D. C., Zara, S. J., and Barber, J. 1984. Application of high resolution spectroradiometry to vegetation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(12): 1725-1735.
- Filella, I., and Peñuelas, J. 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 15(7): 1459-1470.
- Fitz-Rodríguez, E., and Choi, C.Y. 2002. Monitoring turfgrass quality using multispectral radiometry. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 45(3): 865-871.
- Gamon, J. A., Peñuelas, J., and Field, C. B. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41: 35-44.
- Garty, J., Cohen, Y., Kloog, N., and Karnieli, A. 1997. Effects of air pollution on cell membrane integrity, spectral reflectance and metal and sulfur concentrations in lichens. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(7): 1396-1402.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, F. J., García-Haro, F. J. and Meliá, J. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82: 303-310.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., and Lichtenthaler, H. K. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700nm. *Journal*

- of Plant Physiology*, 148: 501-508.
- Guyot, G., and Baret, F. 1988. Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. (Utilisation of the high spectral resolution to follow the status of the covered vegetation.) *Proceedings 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. Aussois, France, 18-22 January 1988*, ESA SP-287, (Paris: ESA), 279-286.
- 本郷千春、小林達明、有田ゆり子. 1998. 分光反射率からみた樹木の水ストレス反応. *写真測量とリモートセンシング*, 37(4): 43-50.
- Horler, D. N. H., Dockray, M., and Barber, J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2): 273-288.
- Huete, A. R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H., and Frangi, J.-P. 2000. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. *Remote Sensing of Environment*, 74: 471-481.
- Ji, L., and Peters, A. J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87: 85-98.
- Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50: 663-666.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Wan, Z., Huete, A. R., van Leeuwen, W., Wolfe, R. E., Giglio, L., Muller, J.-P., Lewis, P. and Barnsley, M. J. 1998. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1228-1249.
- Kaufman, Y. J. and Tanré, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 261-270.
- Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W. and McMurtrey, J. E. 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR). In *Proc. ISPRS'94, Val d'Isere, France 17-21 January 1994*. 299-306.
- 近藤純正. 1992. 地表面温度と熱収支の周期解及びその応用. *農業気象*, 48(3): 265-275.
- 國友淳子、森本幸裕、滝川幸伸、王林和. 1998. 分光反射特性による毛烏素沙地植物群落の生育診断. *ランドスケープ研究*, 61: 577-580.

- Kuusk, A. 1995. A fast, invertible canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 51: 342-350.
- Leprieur, C., Kerr, Y. H., and Pichon, J. M. 1996. Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semi-arid environment. *International Journal of Remote Sensing*, 17(13): 2549-2563.
- Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 350-382.
- Lichtenthaler, H. K., Gitelson, A. A., and Lang, M. 1996. Non destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology*, 148: 483-493.
- Luo, T., Neilson, R. P., Tian, H., Vörösmarty, C. J. Zhu, H. and Liu, S. 2002. A model for seasonality and distribution of leaf area index of forests and its application to China. *Journal of Vegetation Science*, 13: 817-830.
- Luvall, J. C., and Holbo, H. R. 1989. Measurements of short-term thermal responses of coniferous forest canopies using thermal scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 27: 1-10.
- Major, D. J., Baret, F. and Guyot, G. 1990. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 431-441.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B. and Rakitin, V. Y. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106: 135-141.
- 間野かづき、森本幸裕、滝川幸伸. 1999. 透過光植生指数を用いた森林の葉面積指数および乾燥ストレスの推定に関する実験的研究. *ランドスケープ研究*, 62(5): 543-546.
- Miller, J. R., Hare, E. W., and Wu, J. 1990. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance: 1. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10): 1755-1773.
- Moore, K. E., Fitzarrald, D. R., Sakai, R. K., Goulden, M. L., Munger, J. W., and Wofsy, S. C. 1996. Seasonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in central Massachusetts. *Journal of Applied Meteorology*, 35: 122-134.
- 森本幸裕、武井二郎、小南裕志、花山秀文、三輪賢志. 1991. 街路樹ケヤキの活性度診断. *日本緑化工学会誌*, 17(1): 9-15.
- Njoroge, J. B. and Morimoto, Y. 1999. Surface heat energy balance in relation to growth condition of urban park. *環境情報科学論文集*, 13: 61-66.
- 野口俊郎、近津博文. 1985. リモートセンシングによる植物の活力度および植被率の測定に関する研究. *日本リモートセンシング学会誌*, 5(2): 113-119.
- 野中崇志、松永恒雄、沢辺頼子、森山雅雄、外岡秀行. 2002. 地上ターゲットを用いた Terra

- ASTER と Landsat-7/ETM+ の熱赤外バンドの輝度校正. 日本リモートセンシング学会誌, 22(1): 62-78.
- Pearson, R. L. and Miller, L. D. 1972. Remote sensing of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In *Proc. 8th Int. Symp. on Remote Sens. of Environ.*, ERIM, Ann Arbor, MI, 1357-1381.
- Peñuelas, J., Baret, F., and Filella, I. 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids / chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31: 221-230.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and Savé, R. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14(10): 1887-1905.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R. and Filella, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13): 2869-2875.
- Pinty, B. and Verstraete, M. M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101: 15-20.
- Pontailleur, J-Y., Hymus, G. J., and Drake, B. G. 2003. Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(3): 381-387.
- Porra R.J., Thompson, W. A., and Kriedemann, P. E. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*, 975: 384-394.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H. and Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126.
- R Development Core Team (2003). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-00-3, URL <http://www.R-project.org>.
- Richardson, A. J. and Wiegand, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43: 1541-1552.
- Rock, B. N., Hoshizaki, T., and Miller, J. R. 1988. Comparison of *in situ* and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*, 24: 109-127.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55: 95-107.
- Roujean, J. L. and Breon, F. M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from

- bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51: 375-384.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. and Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371pp.
- Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Mohammed G.H., Miller J.R. and Noland T.L. 2003. Hyperspectral remote sensing of forest condition: Estimating chlorophyll content in tolerant hardwoods. *Forest Science*, 49 (3): 381-391.
- Shan, Y. 1998. Effects of simulated acid rain on *Pinus densiflora*: inhibition of net photosynthesis by the pheophytization of chlorophyll. *Water, Air and Soil Pollution*, 103: 121-127.
- Smith, M. L., Ollinger, S. V., Martin, M. E., Aber, J. D., Hallett, R. A., and Goodale, C. L. 2002. Direct estimation of aboveground forest productivity through hyperspectral remote sensing of canopy nitrogen. *Ecological Applications*, 12(5): 1286-1302.
- Tang, L., Okazawa, A., Fukusaki, E., and Kobayashi, A. 2000. Removal of magnesium by Mg-dechelataase is a major step in the chlorophyll-degrading pathway in Ginkgo biloba in the process of autumnal tints. *Zeitschrift fur Naturforschung C - A Journal of Biosciences*, 55(11-12): 923-926.
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16: 128-141.
- Xiao, X. M., Braswell, B., Zhang, Q. Y., Boles, S., Frolking, S., and Moore, B. 2003. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: continental-scale observations in Northern Asia. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 385-392.
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Mohammed, G. H., Noland, T. L., and Sampson, P. H. 2002. Vegetation stress detection through chlorophyll a+b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *Journal of Environmental Quality*, 31(5): 1433-1441.
- Zarco-Tejada, P. J., Pushnik, J. C., Dobrowski, S., and Ustin, S. L. 2003. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*, 84: 283-294.